

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Simulace elektronických obvodů
Simulation of Electronic Circuits

Prohlášení Studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě.....

Podpis studenta.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu panu Prof.Ing.Pavlu Brandštetterovi, Csc. za podnětné rady při řešení problémů, které doprovázely mou práci, za vedení bakalářské práce a za jeho trpělivost při konzultacích.

Zadání bakalářské práce

Student:

Radek Šulák

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika

Téma:

Simulace elektronických obvodů

Simulation of Electronic Circuits

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor vybraných typů elektronických obvodů.
2. Vytvoření simulačních modelů pomocí programu OrCad - PSpice.
3. Simulace činnosti vybraných typů elektronických obvodů pomocí programu OrCad - PSpice.
4. Analýza výsledků simulací a jejich porovnání s teoretickými předpoklady.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Abstrakt:

Podstatou bakalářské práce je simulace činnosti zapojení různých druhů elektronických obvodů. Simulace se provádí v programu OrCad – Pspice, který je produktem společnosti Cadence Design Systems, Inc., s licencí VŠB – TU Ostrava. Na závěr se zaměřuje na vyhodnocování výsledků jednotlivých simulací. Vše je srovnáno s teoretickými podklady.

Klíčová slova:

Elektrický obvod, usměrňovač, RC filtr, LC filtr, stabilizátor napětí, regulátor napětí, tranzistorový zesilovač.

Abstract:

The main object of my bachelor thesis is simulation of different kinds of electronical circuits. The thesis also deals with the working connectivity within the circuits. The simulation is performed by programme OrCad - Pspice, which is the product of Cadence Design Systems, Inc., company and is licensed to VŠB - TU Ostrava. In the ending, there is an evaluation of simulated outputs and their comparison with theoretical assumptions.

Key words:

Electric circuit, rectifier, RC filter, LC filter, voltage stabilizers, voltage regulator, tranzistorized amplifier.

Seznam použitých zkratk a symbolů

A_u	napěťový zisk	(dB)
A_i	proudový zisk	(dB)
C	kondenzátor	
$CMRR$	činitel potlačení souhlasného napětí	
D	dioda	
f	frekvence	(Hz)
$F(p)$	přenosová funkce	
f_c	kritická frekvence	(Hz)
f_D	dolní frekvence	(Hz)
f_H	horní frekvence	(Hz)
f_L	dolní frekvence	(Hz)
f_r	rezonanční frekvence	(Hz)
I	proud	(A)
I_{AV}	střední hodnota proudu	(A)
I_{BP}	klidový pracovní proud bázi	(A)
I_{BMAX}	maximální bázevý proud	(A)
I_{CMAX}	maximální kolektorový proud	(A)
I_C	kolektorový proud	(A)
I_{CEO}	proud mezi kolektorem a emitorem	(A)
I_{CP}	klidový pracovní proud kolektoru	(A)
I_D	proud diodou	(A)
I_{EP}	klidový pracovní proud emitoru	(A)
I_P	proud protékající odporem	(A)
I_{in}	vstupní proud	(A)
I_{FSM}	maximální neopakovatelný propustný proud	(A)
I_M	maximální proud	(A)
I_R	proud protékající odporem	(A)
I_Z	proud zátěží	(A)
I_{ZMAX}	maximální proud Zenerovou diodou	(A)
I_{ZOPT}	optimální proud zátěží	(A)
I_{2MIN}	minimální proud zátěže	(A)
I_{2MAX}	maximální proud zátěže	(A)
k	konstanta	
L	cívka	
P_Z	ztrátový výkon	(W)
P_{CMAX}	maximální kolektorová ztráta	(W)
R	rezistor	
R_C	kolektorový rezistor	
R_{dZ}	odpor diody	(Ω)
R_Z	rezistor zátěže	

R_I	vnitřní odpor	(Ω)
R_{om}	omezovací rezistor	
R_E	emitorový rezistor	
S	činitel stabilizace	
t	čas	(s)
T	tranzistor	
U_{AV0}	napětí naprádno	(V)
U_{BE0}	napětí mezi emitorem a bází	(V)
U_{CB}	napětí mezi kolektorem a bází	(V)
U_{cc}	napájecí napětí	(V)
U_{CE}	napětí mezi kolektorem a emitorem	(V)
U_D	napětí na diodě	(V)
U_{ef}	efektivní napětí	(V)
U_G	napětí na generátoru	(V)
U_{IN}	vstupní napětí	(V)
U_M	maximální napětí	(V)
U_o	výstupní napětí	(V)
U_{OUT}	výstupní napětí	(V)
U_{RE}	napětí na emitorovém rezistoru	(V)
U_Z	napětí na zátěži	(V)
U_2	napětí na zátěži	(V)
X_c	kapacitní reaktance	(Ω)
X_L	induktivní reaktance	(Ω)
Z_A	paralelní kombinace impedancí	(Ω)
Z_B	paralelní kombinace impedancí	(Ω)
Z_D	Zenerova dioda	
Z_G	vnitřní impedance	(Ω)
Z_I	vstupní impedance	(Ω)
Z_Z	zatěžovací impedance	(Ω)
Z_{TI}	vstupní impedance aktivního prvku	(Ω)
Z_O	výstupní impedance	(Ω)
Z_{TO}	výstupní impedance aktivního prvku	(Ω)
∞	nekonečno	
π	Ludolfovo číslo	
ΔU	úbytek napětí	(V)
φ	fázový posuv	($^\circ$)

Obsah:

1 Úvod	9
2 Usměrňovač	11
2.1 Jednofázový jednocestný jednopulzní usměrňovač	12
2.2 Jednofázový dvoucestný dvoupulzní usměrňovač.....	15
2.3 Analýza výsledků.....	19
3 Filtry	20
3.1 Aktivní filtry	20
3.2 Pasivní filtry.....	21
3.3 Analýza výsledků.....	24
4 Stabilizátor a regulátor stejnosměrného napětí	25
4.1 Parametrický stabilizátor se Zenerovou diodou.....	25
4.2 Regulátor stejnosměrného napětí.....	28
4.2.1 Sériový regulátor stejnosměrného napětí	29
4.3 Analýza výsledků.....	32
5 Tranzistorové zesilovače	33
5.1 Základní vlastnosti zesilovačů	34
5.2 Nastavení a stabilizace klidového pracovního bodu	36
5.2.1 Obvody se zápornou zpětnou vazbou.....	36
5.3 Jednostupňový zesilovač	37
5.4 Vícestupňové zesilovače.....	40
5.4.1 Třístupňový zesilovač	40
5.5 Rozdílový (diferenční) zesilovač	41
5.6. Analýza výsledků.....	43
6 Závěr	45
Použitá literatura	46

1 Úvod

Elektronika obklopuje celý náš svět. Používání elektroniky se stalo realitou všedního dne, aniž by si to člověk uvědomoval. Např. už od ranních hodin, kdy jsme vzbuzeni budíkem, uvařením kávy v kávovaru nebo čaje ve varné konvici, použitím automobilu nebo městské hromadné dopravy, abychom se dostali do práce, používáním počítačů, elektrických nástrojů, mobilních telefonů a dalších zařízení v pracovním procesu. Všude se objevuje elektronika. Bez tohoto oboru, který zcela zasahuje do vědeckých, pracovních, ale i osobních oblastí, bychom si život nedokázali představit. Jednoduše řečeno, člověk, který žije v době, v které vládne elektronický průmysl, by se bez elektroniky objevil v „době kamenné“. Aniž by člověk, který se o elektroniku nezajímá, tušil, tak obor elektronika využívá poznatků i z jiných oblastí, např. matematika, fyzika apod. a vytváří tak základy pro jiné oblasti využívajícího právě tohoto oboru.

Elektronika je přitom docela mladý technický obor a prochází neustálým prudkým vývojem. Největším významným objeveným prvkem byla elektronka. Při pokusech se žárovkou objevil Thomas Alva Edison jev dnes známý jako termoemise elektronů v roce 1883. První elektronky byly zkonstruovány až na začátku 20.století. Dalším historickým mezníkem bylo objevení polovodičů, následně diody, která byla objevena J.A.Flemingem v roce 1904. Poté následovala éra tranzistorů. Tranzistor byl objeven v roce 1947 v Belloových laboratořích vědci W.Shockley, John Bardeen, W.H.Brattainem, kteří za tento objev dostali v roce 1956 Nobelovu cenu. Přechod od elektronek k tranzistorům znamenal obrovský průlom a miniaturizaci. V roce 1958 vyrobil Jack Kilby integrovaný obvod, který v jednom pouzdře obsahoval čtyři tranzistory, který byl dalším zlomem ve vývoji elektroniky. Dnes dokážeme na polovodičové destičce jediného integrovaného obvodu realizovat až desítky miliónů součástek. Jejich velikost se dostala například u procesorů až pod hranici nanometru. Téměř bleskový vývoj elektroniky můžeme zpozorovat u osobních počítačů. Používané technologie se neustále vyvíjejí a jednotlivé komponenty se neustále zmenšují, např. procesor se skládá až ze stovek miliónů tranzistorů. [12, 13, 14]

V této práci se zaměřuji na ověření teoretických předpokladů, činnosti jednotlivých elektronických prvků, které jsou zmíněny níže v příslušných kapitolách. Například z uváděných elektronických prvků, které zpracovávám v bakalářské práci je usměrňovač součástí většiny elektronických přístrojů a zařízení spotřební elektroniky, napájených z elektrické sítě, protože k distribuci elektrické energie se využívá hodně střídavý proud a přístroje ke své funkci obvykle potřebují stejnosměrný proud.

Obvykle na výstupu usměrňovače bývá zařazen výstupní filtr, který slouží k potlačení nebo zdůraznění určitých kmitočtů. Tyto filtry můžeme nalézt ve frekvenčních oblastech.

Většina elektronických přístrojů a zařízení také potřebuje pro svou správnou funkci konstantní napětí, které může kolísat z důvodu změny napětí v elektrické síti. Proto je na výstup za usměrňovačem a filtrem připojen stabilizátor nebo regulátor stejnosměrného napětí, který právě vyreguluje napětí a bude ho udržovat na konstantní hodnotě. Regulátor můžeme nalézt

například v automobilu jako regulátor alternátoru, který udržuje výstupní napětí na konstantní hodnotě.

Zesilovače slouží k zesílení vstupního signálu. Tyto obvody využívá skoro každé elektrické zařízení. Nejčastěji se používají v audio technice a nebo také v rádiové a televizní technice k zesílení např. vysílacího a nebo přijímacího zařízení. Tento elektronický prvek je součástí většiny elektronických přístrojů a zařízení spotřební elektroniky a je široce využíván.

Má práce má za úkol provést analýzu zadaných elektronických obvodů a jednotlivé výsledky simulací ověřit s teoretickými, pevně danými, předpoklady. Tato práce také slouží k ověření mých znalostí, které jsem po dobu tříletého studia nasbíral. Tyto poznatky si můžeme nejlépe ověřit prakticky. K tomu můžeme využít různých softwarů, které slouží k simulaci elektrických obvodů.

2 Usměrňovač

Všechna elektronická zařízení potřebují pro svůj provoz stejnosměrná napájecí napětí, která má dodávat jeden nebo více zdrojů stejnosměrného napětí. Při větším proudovém odběru je použití baterií neekonomické, proto se používá síťového napájení ze střídavé sítě. Ale je zde nutná transformace střídavého napětí na stejnosměrné napětí. Lze říci, že proud vede jen jedním směrem a vlastně tak propouští na svůj výstup jen jednu ze složek střídavého proudu – podle jejich polarity – buď kladnou nebo zápornou.

Základními stavebními prvky jsou usměrňovací diody (případně tyristory), přičemž je využita vlastnost přechodu P-N – usměrňovací jev. Pro návrh zapojení usměrňovačů musíme znát hodnotu středního proudu v propustném směru, hodnotu špičkového proudu a hodnotu maximálního závěrného napětí. Výstupní napětí má obvykle zvlněný průběh, proto je nutné jej ještě filtrovat, obvykle pomocí kondenzátoru jako vyhlazovací filtr. Většina elektronických zařízení vyžaduje pro svou činnost konstantní stejnosměrné napětí. Proto je za usměrňovač s filtrem zapojen stabilizátor napětí. [1]

Usměrňovače můžeme rozdělit podle několika hledisek:

1.) podle počtu fází

- a) jednofázové
- b) trojfázové
- c) m – fázové

2.) podle způsobu řízení

- a) neřízené
- b) polořízené
- c) řízené

3.) podle způsobu zapojení

- a) uzlové
- b) můstkové
- c) jednocestné

4.) podle tvaru usměrněného napětí

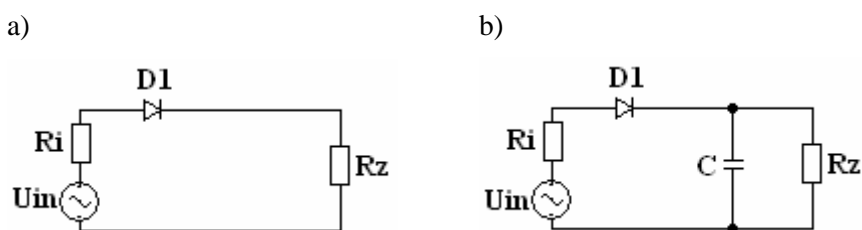
- a) jednopulzní
- b) dvoupulzní
- c) trojpulzní
- d) šestipulzní
- e) n – pulzní

[1]

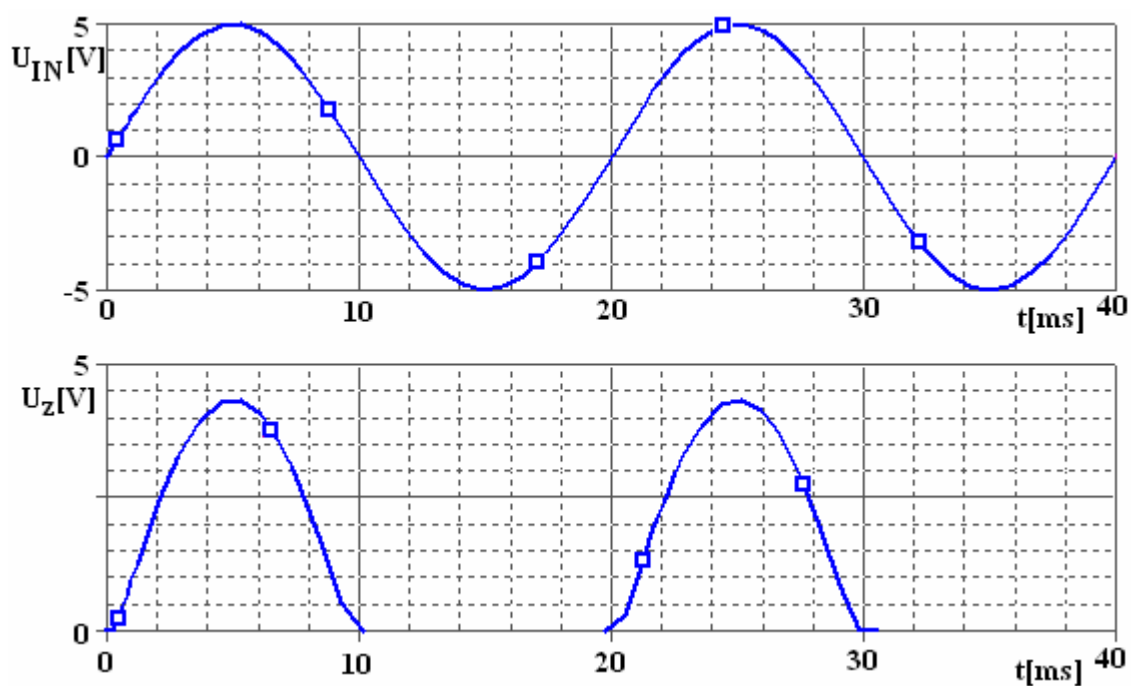
2.1 Jednofázový jednocestný jednopulzní usměrňovač

Je to nejjednodušší zapojení usměrňovače, kdy v sérii se zátěží je zapojena dioda v propustném směru. V zapojení na obr.2.1.1 dioda vede pouze při kladné půlvlně střídavého napětí, které dodává transformátor. Nevýhodou uvedeného zapojení je velké zvlnění usměrněného napětí. Jelikož napětí, které se objevuje na zátěži má tvar pulzujícího stejnosměrného napětí, je na křivce vidět značná prodleva mezi jednotlivými kladnými půlvlnami. Musíme proto zajistit, aby i v době, kdy je dioda uzavřena, mohl zátěží protékat proud. To nám umožní kondenzátor C, který je zapojen paralelně k zatěžovacímu odporu, a který slouží k vyhlazení, neboť jeho náboj dodává do zátěže proud právě po dobu, kdy je napětí za diodou na nule. Je – li dioda při kladné půlvlně otevřena, kondenzátor se nabíjí. Současně tak protéká nabíjecí proud kondenzátorem a proud zátěží. Během záporné půlvlny, v níž je dioda uzavřena, dodává nabitý kondenzátor energii do zatěžovacího odporu, čímž se vybíjí. Jak kondenzátor C pulzující stejnosměrné napětí vyhladí, záleží hlavně na dvou podmínkách:

- na velikosti kapacity kondenzátoru C – čím je kapacita menší, tím více se kondenzátor v průběhu záporné půlvlny vybíjí a tím je i větší zvlnění výstupního napětí
- na velikosti zatěžovacího odporu – čím má větší hodnotu, tím je proud menší a tím je také menší vybíjení kondenzátoru. Pokud odpojíme zatěžovací odpor ($R \rightarrow \infty$), kondenzátor se nabije na vrcholovou hodnotu výstupního napětí transformátoru sníženou o úbytek na diodě. [2]



Obr.2.1.1 Jednofázový jednocestný jednopulzní usměrňovač
a) s odporovou zátěží b) s kapacitním filtrem [1]



Obr.2.1.2 Jednofázový usměrňovač s odporovou zátěží

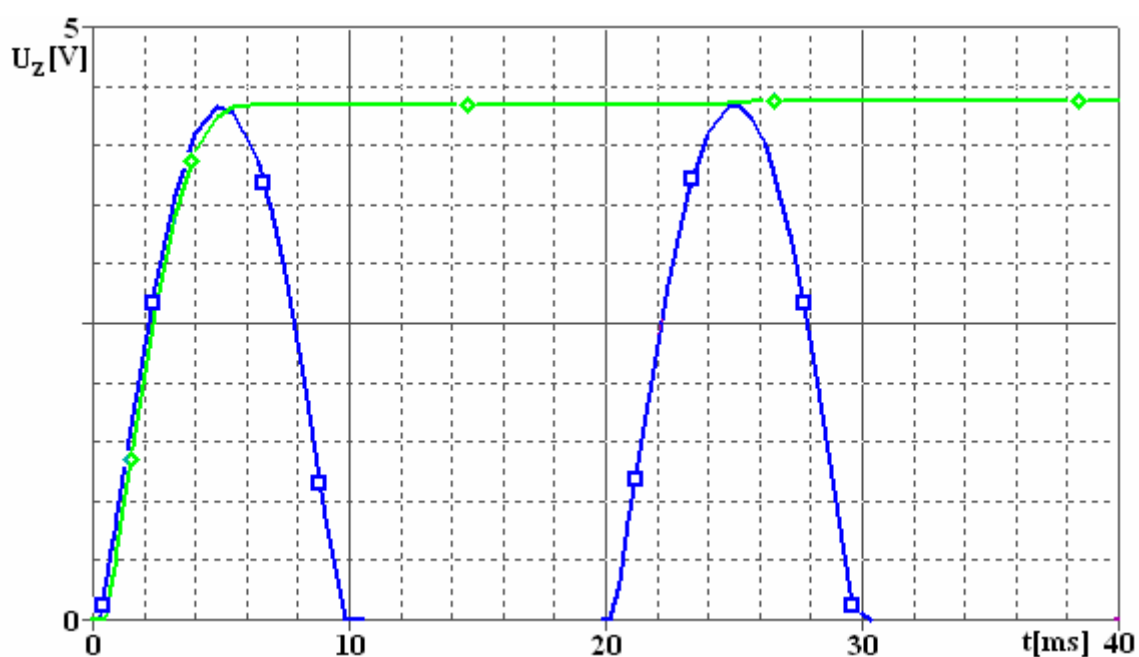
Z všeobecného hlediska se tento typ usměrňovačů v praxi nepoužívá, ale můžeme je najít tam, kde nejsou velké nároky na zvlnění výstupního napětí.

Střední hodnota usměrněného proudu je dána vztahem:

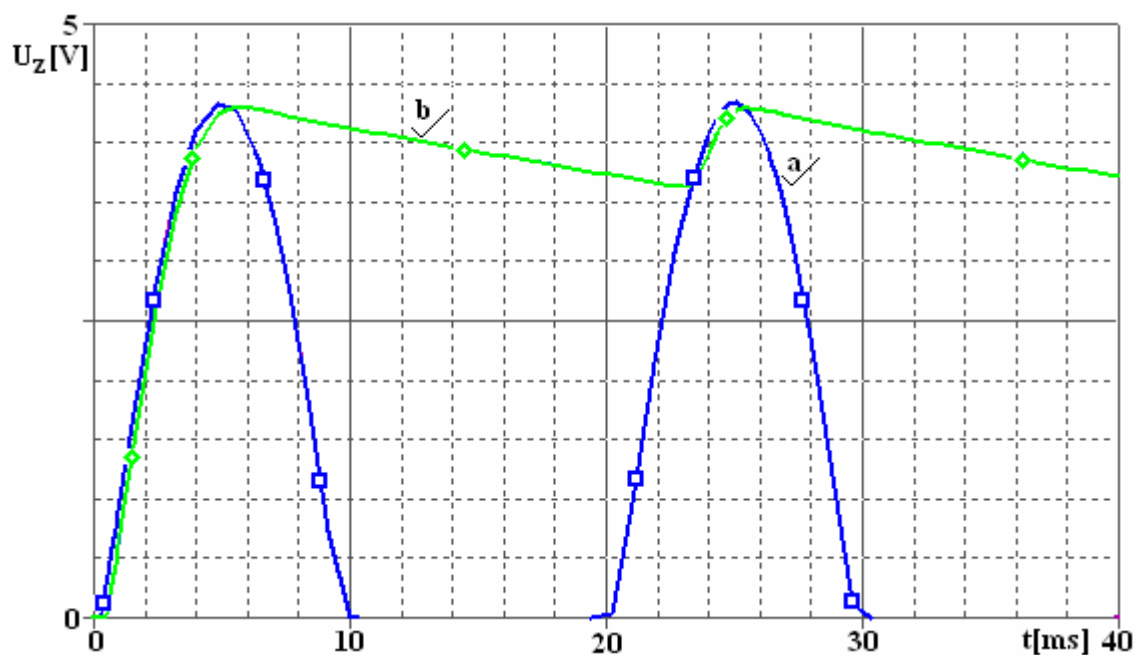
$$I_{AV} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t = \frac{I_m}{2\pi} [-\cos(\omega t)]_0^{\pi} = \frac{I_m}{\pi} \quad [1]$$

Napětí při chodu naprázdno

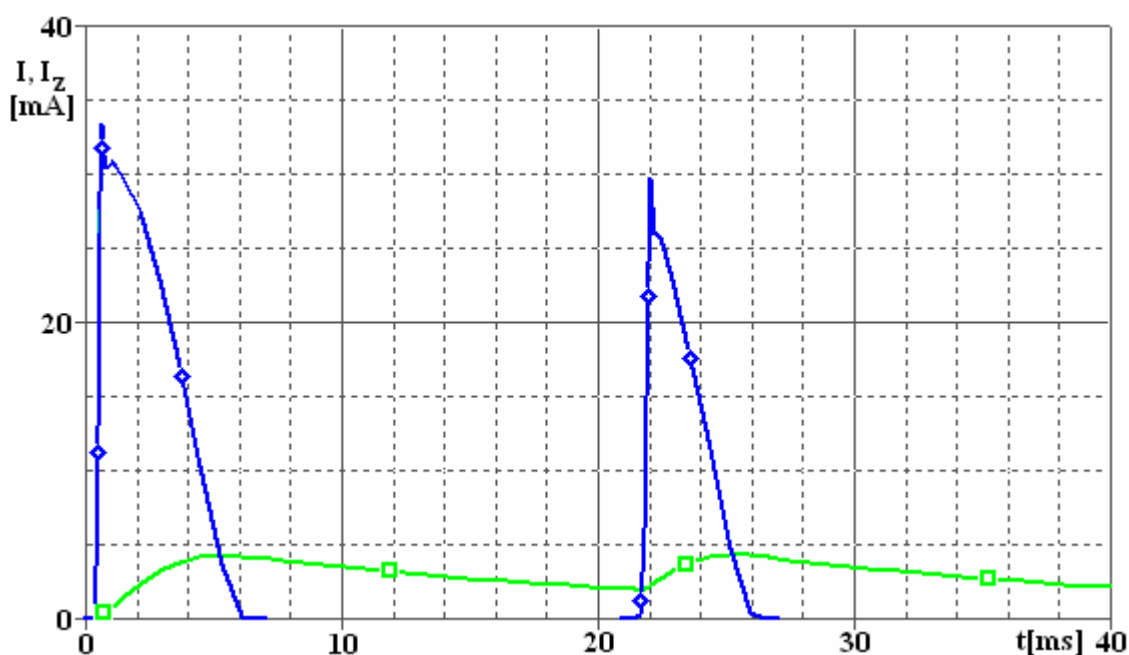
$$U_{AV0} = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{ef}}{\pi} = k \cdot U_{ef} = 0,45 \cdot U_{ef} \quad [1]$$



*Obr.2.1.3 Jednofázový jednocestný jednopulzní usměrňovač kapacitním filtrem
Průběh napětí bez zatěžovacího odporu ($R \rightarrow \infty$)*



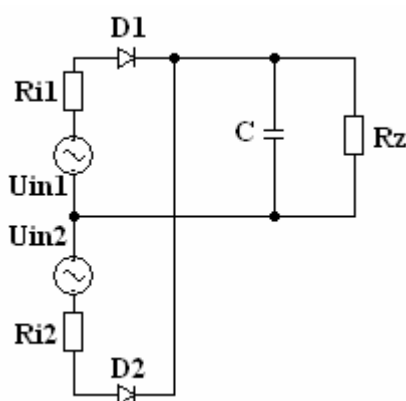
*Obr.2.1.4 Jednofázový jednocestný jednopulzní usměrňovač-průběh napětí
a) bez kapacitního filtru b) s kapacitním filtrem*



Obr.2.1.5 Jednocestný usměrňovač s kapacitním filtrem-průběh proudu

2.2 Jednofázový dvoucestný dvoupulzní usměrňovač

Dvoucestný usměrňovač poskytuje na výstupu mnohem menší zvlnění stejnosměrného napětí, protože jsou usměrňovány dvě půlvlny střídavého proudu, každá je však fázově posunuta. Rozlišujeme dvoucestné usměrňovače s rozděleným sekundárním vinutím síťového transformátoru usměrňovače můstkové. A proto se pro napájení elektrických spotřebičů využívají dvoucestná zapojení usměrňovačů. [2, 5]



Obr.2.2.1 Jednofázový dvoucestný dvoupulzní usměrňovač v uzlovém zapojení [1]

Dvoucestný dvoupulzní usměrňovač v uzlovém zapojení využívá obě půlvlny střídavého napětí. Vyžaduje to ovšem použití zdroje, který je schopen dodávat velikostně stejná napětí, ale posunuta o 180°. V praxi získáváme taková napětí ze síťového transformátoru s odbočkou uprostřed sekundárního vinutí. Což je také nevýhoda tohoto usměrňovače. Náklady na transformátor jsou příliš velké. [4]

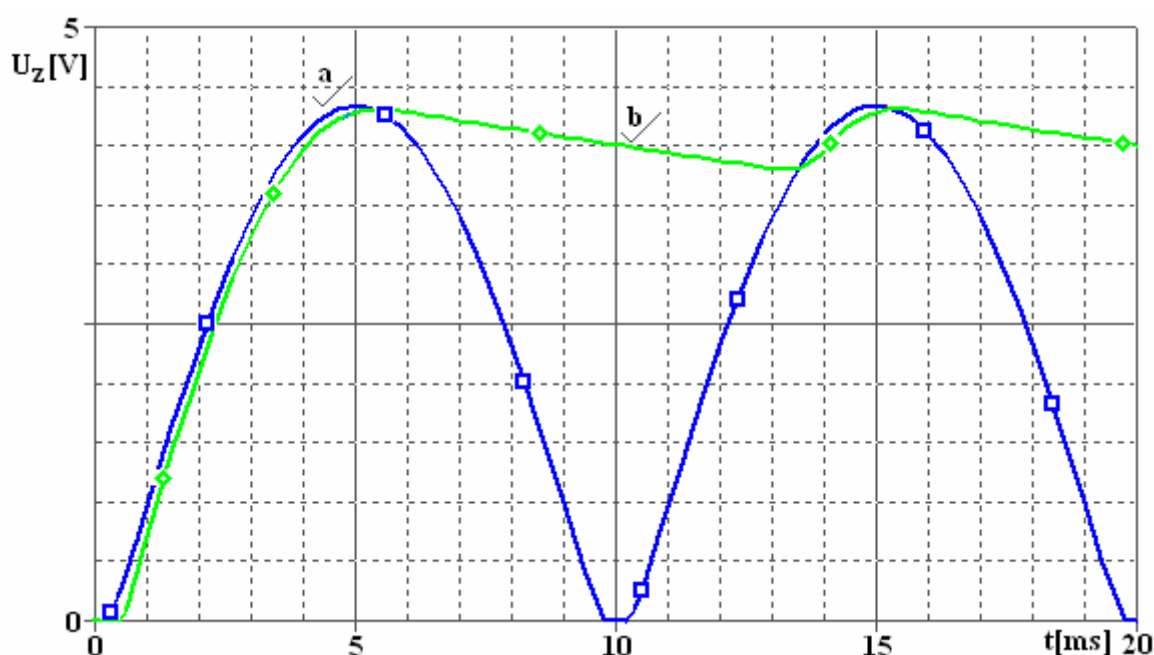
Celkový proud je tvořen dvěma pulzy, kdy horní vinutí transformátoru spolu s diodou představují jeden pulz kladného výstupního napětí a spodní vinutí transformátoru spolu s diodou představují druhý pulz kladného výstupního napětí. [2]

Střední hodnota usměrněného proudu je dána vztahem

$$I_{AV} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t = \frac{I_m}{\pi} [-\cos(\omega t)]_0^{\pi} = \frac{2I_m}{\pi} \quad [1]$$

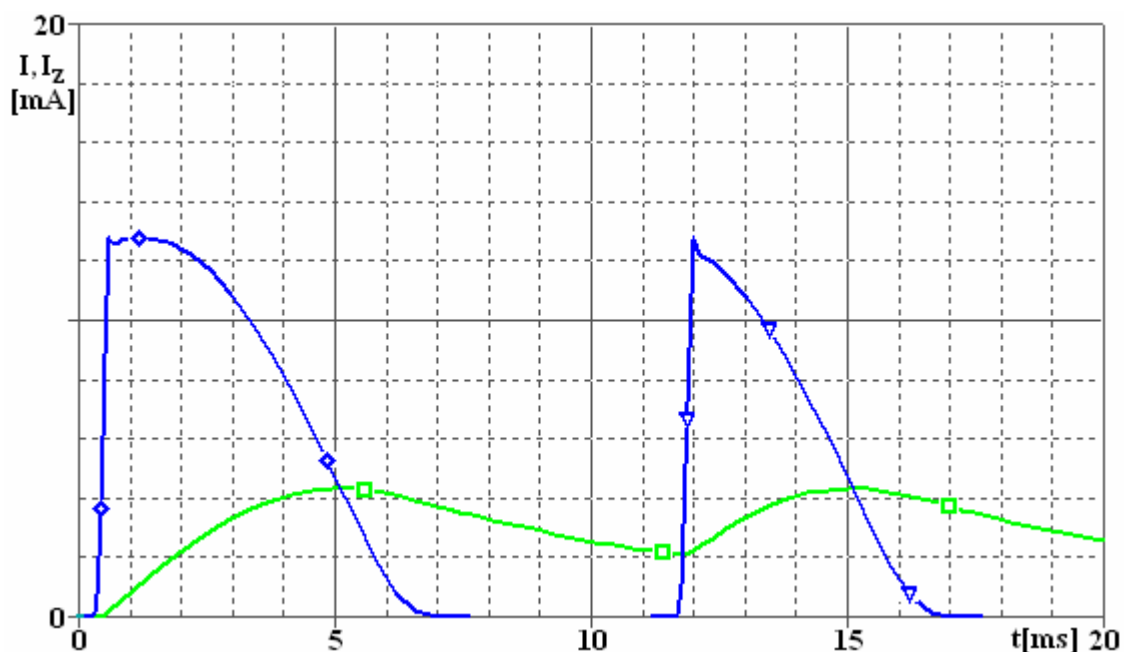
Napětí při chodu naprázdno

$$U_{AV0} = \frac{2U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_{ef}}{\pi} = 0,9 \cdot U_{ef} \quad [1]$$

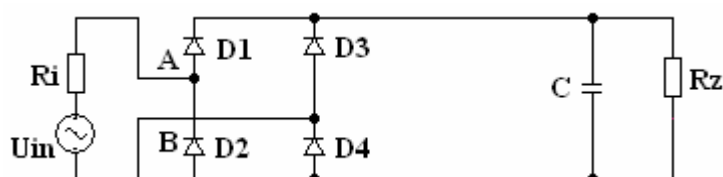


Obr.2.2.2 Jednofázový dvoucestný dvojpulzní usměrňovač v uzlovém zapojení-průběh napětí
a) bez kapacitního filtru b) s kapacitním filtrem

Při prvním připojení usměrňovače k napájecí síti může dojít ke zničení usměrňovacích diod nadměrným nabíjecím proudem vyhlazovacího kondenzátoru, který nesmí přesáhnout I_{FSM} diody(). Aby se tomuto jevu zabránilo, předřazuje se ochranný odpor R_{om} , který omezí nabíjecí proud. [1]



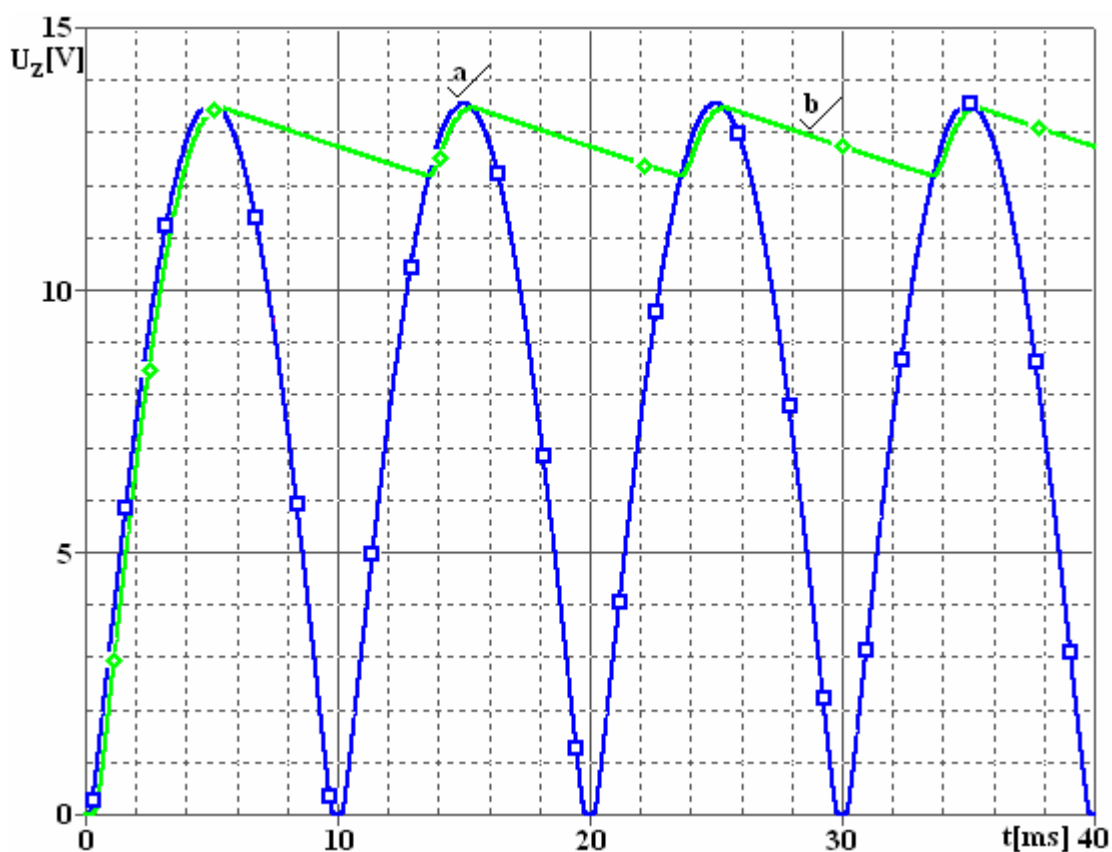
Obr.2.2.3 Jednofázový dvoucestný dvojpulzní usměrňovač v uzlovém zapojení-průběh proudu



Obr.2.2.4 Jednofázový dvoucestný dvojpulzní usměrňovač v můstkovém zapojení [1]

Dvoucestný dvoupulzní usměrňovač v můstkovém zapojení (Graetzovo zapojení) je nejpoužívanější zapojení vůbec. Nevyžaduje však dvojí vinutí napájecího transformátoru, ale vyžaduje použití čtyř diod, což je také nevýhoda tohoto zapojení, jelikož je na diodách dvakrát větší úbytek napětí než v uzlovém zapojení. [4]

Je-li na bodu A větší kladný potenciál než na bodu B, protéká proud diodami D_1 a D_4 . Diody D_2 a D_3 jsou během této půlveiny uzavřeny. Na další půlveinu je na bodu B větší kladný potenciál než na bodu A a proud protéká diodami D_2 a D_3 . Diody D_1 a D_4 jsou uzavřeny. Napětí na zatěžovacím odporu se vyhlazuje kondenzátorem C. [2, 4]



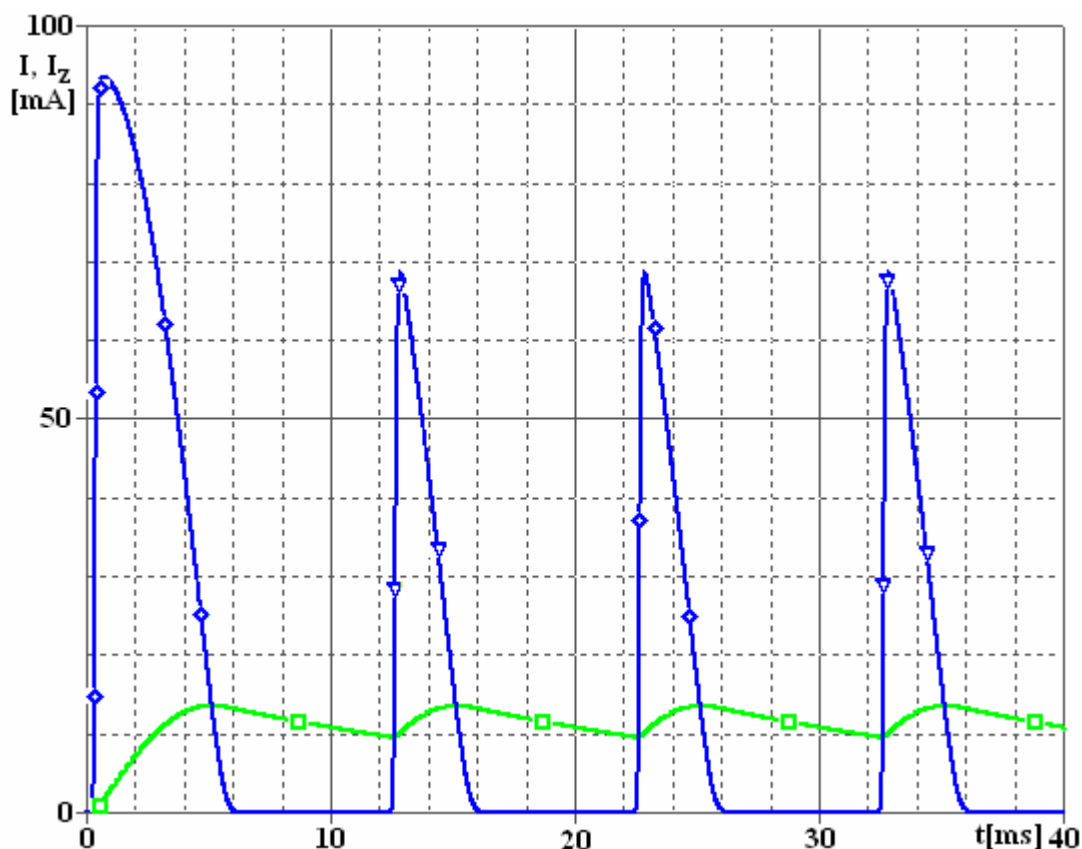
Obr.2.2.5 Jednofázový dvoucestný dvojpulzní usměrňovač v můstkovém zapojení-průběh napětí
a) bez kapacitního filtru b) s kapacitním filtrem

Střední hodnota usměrněného proudu je dána vztahem

$$I_{AV} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t = \frac{I_m}{\pi} [-\cos(\omega t)]_0^{\pi} = \frac{2I_m}{\pi} \quad [1]$$

Napětí při chodu naprázdno

$$U_{AV0} = \frac{2U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_{ef}}{\pi} = 0,9 \cdot U_{ef} \quad [1]$$



Obr.2.2.6 Jednofázový dvoucestný dvojpulzní usměrňovač v můstkovém zapojení-průběh proudu

2.3 Analýza výsledků

Při simulaci jednocestného jednopulsního usměrňovače byly dosaženy výsledky shodující se s předpoklady. Je vidět, že kladná půlvlna, v první půlperiodě, je snížena o úbytek na diodě. Druhou půlperiodu je napětí nulové. Proud pro odporovou zátěž kopíruje tvarem napětí, ale jeho průběh je užší o čas, kdy je dioda ještě uzavřena a proud jí neprotéká. Při zapojení s filtračním kapacitorem a zátěží jejíž odpor je nekonečně velký, by se kapacitor nabil na hodnotu zdrojového napětí sniženou o úbytek na diodě. Pro běžné hodnoty odporu zátěže se projevil jev, kdy se kapacitor nejdříve nabil na hodnotu napětí zdroje, sniženou o úbytek na diodě, a po poklesu napětí pod tuto úroveň začal dodávat energii do zátěže, čímž došlo ke snížení napětí až do doby než napětí zdroje opět překročilo napětí kapacitoru a ten se začal znovu nabíjet. Na průběhu proudu je vidět, že vlivem absence omezovacího odporu před kapacitorem není jeho nabíjecí proud nijak omezen, což klade zvýšené nároky na použitou diodu. Tomu se dá zabránit volbou optimálně velkého odporu zařazeného do série s kapacitorem. Jeho hodnota musí být dostatečně velká aby plnil omezovací funkci, ale ne příliš velká, aby zbytečně neomezoval rychlost nabíjení a nezhoršoval tak filtrační schopnosti kapacitoru. Velikost kapacity určuje úroveň filtrace. Stejně tak odpor zátěže určuje velikost protékajícího proudu a tím i rychlosti vybíjení kapacitoru. Z průběhu je vidět, že při prvotním nabíjení nebo v režimu přerušovaných proudů je velikost proudu odebíraného kapacitorem vyšší než v režimu spojitého proudu. Snížení zvlnění proudu je možno dosáhnout také zvýšením počtu pulzů usměrňovače. To má

však omezení v nutnosti většího počtu fází neboť z jednofázového zdroje nelze vytvořit více než dvoupulzní průběh.

3 Filtry

Z důvodu, že některá elektrická zařízení jsou citlivá na výstupní napětí je nutné výstupní napětí usměrňovače, který obsahuje střídavou složku a která se může přenášet do užitečného signálu zpracovávaného elektronickými obvody, nadále filtrovat. Nejčastěji je k výstupu usměrňovače připojen vyhlazovací filtr, který zmenšuje zvlnění stejnosměrného napětí. [1]

Řád filtru určuje, s jakou přesností jsou modelovány přenosové charakteristiky filtru. [8]

Z všeobecného hlediska můžeme filtry rozdělit na:

- aktivní
- pasivní

3.1 Aktivní filtry

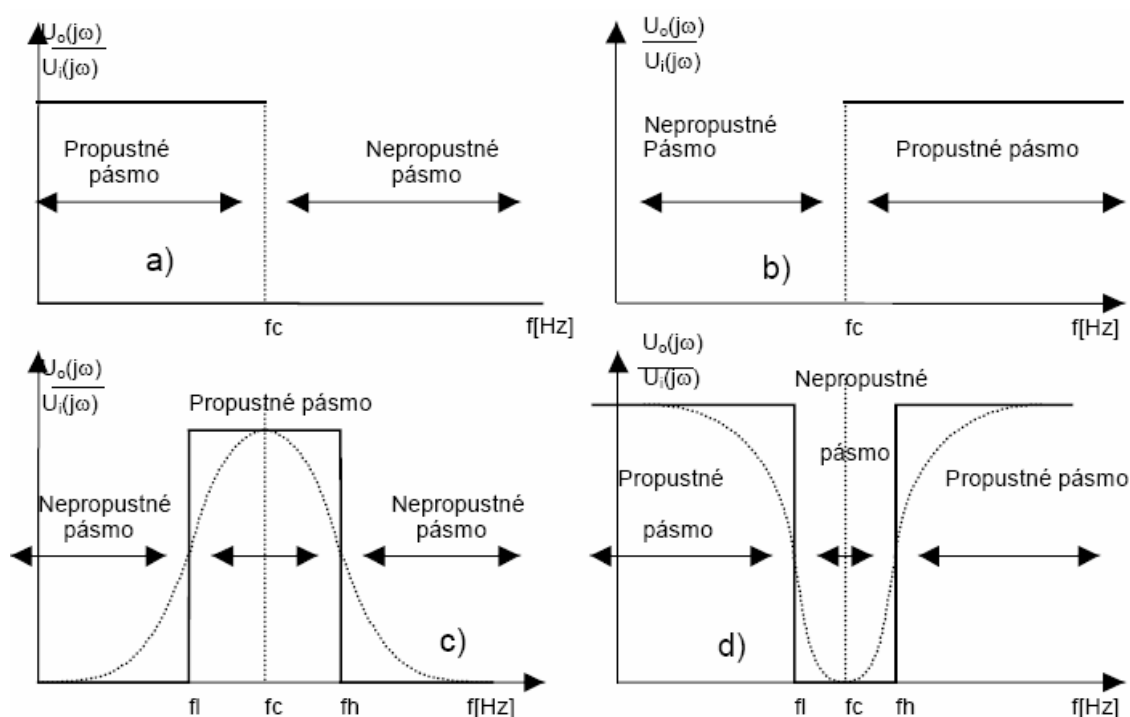
Aktivní filtry jsou filtry využívající aktivní součástky pro vytvoření přenosových funkcí s požadovanou závislostí na frekvenci. V současnosti je nejvíce používán aktivní prvek operační zesilovač. Samozřejmě, že se zde používá i pasivních prvků, které jsou prezentovány odpory a kondenzátory. Z toho je zřejmé, že pracovní oblast pro vysoké frekvence je dána použitím operačních zesilovačů a tzn., že jsou omezeny do 1 MHz. Největší výhodou těchto filtrů je, že jsou zde vyloučeny indukty, které jsou charakterizovány velkými rozměry, velkou cenou atd. Další výhodou je, že operační zesilovače kompenzují útlum, které do obvodu vnášejí pasivní prvky. Návrh aktivních filtrů je možný dvěma způsoby. První způsob spočívá v použití jednoho operačního zesilovače, který je obklopen pasivními prvky. Tento způsob se nepoužívá jelikož jeho návrh je pracný a vznikají problémy s nastavením filtru. Druhý, jednodušší a více používanější, způsob spočívá v návrhu aktivních filtrů, kdy každý filtr má svou přenosovou funkci, která je realizována jedním operačním zesilovačem. Tyto filtry jsou zapojeny do kaskády. [6, 7]



Obr. 3.1.1 Kaskádní řazení [6]

Rozlišujeme 4 základní typy filtrů:

- a) horní propust
- b) dolní propust
- c) pásmová propust
- d) pásmová zadrž



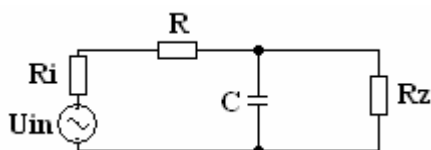
Obr. 3.1.2 Frekvenční vlastnosti 4 základních filtrů: a) dolní propust, b) horní propust, c) pásmová propust, d) pásmová zadrž [7]

3.2 Pasivní filtry

Nejjednodušší realizace filtru je pomocí pasivních elektrotechnických součástek R, L, C za jejichž pomoci můžeme sestavovat filtry typu RC, LC, RLC a pomocí nich lze modelovat filtry upravující frekvenční charakteristiky. Zásadně se používají filtry typu: [8]

- odporové – RC

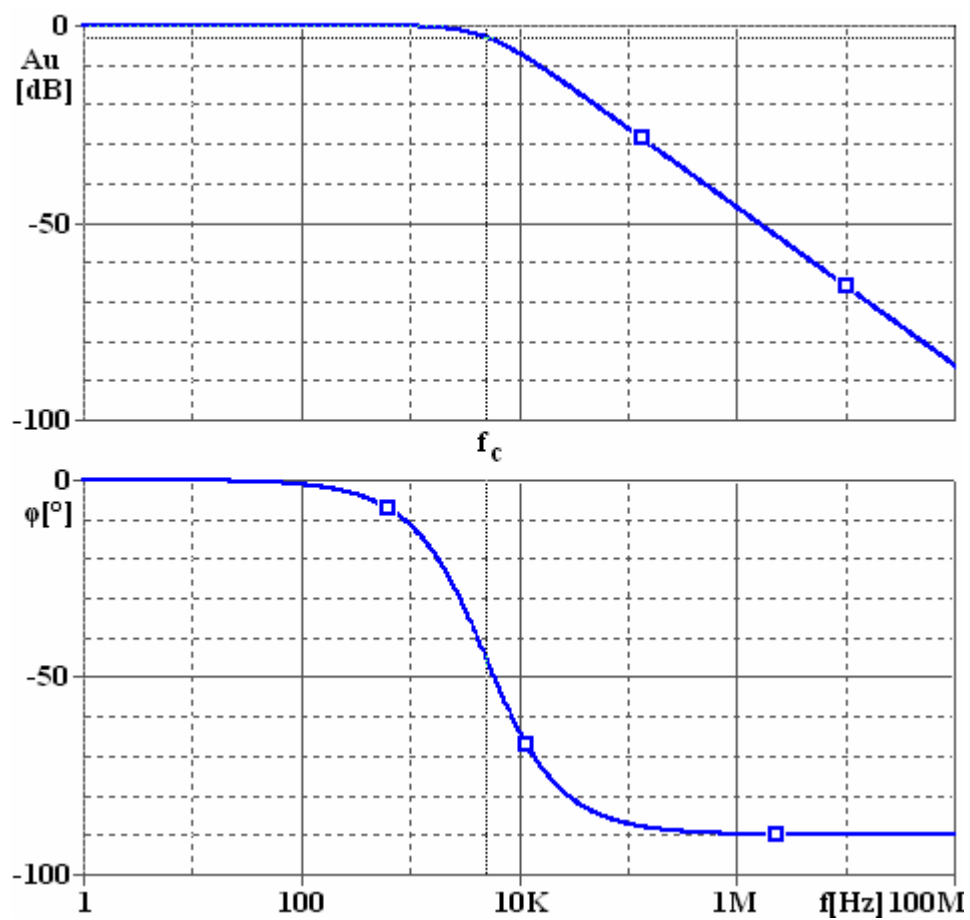
Výhodou odporových filtrů jsou malé rozměry, jejich hmotnost a jejich nízká cena. Nevýhodou těchto filtrů je snížení výsledného napětí právě o úbytek napětí na odporu. [1]



Obr. 3.2.1 Pasivní filtr typu RC [1]

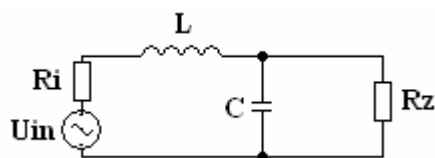
Výpočet kritické frekvence:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$



Obr. 3.2.2 Frekvenční charakteristiky pasivního RC filtru

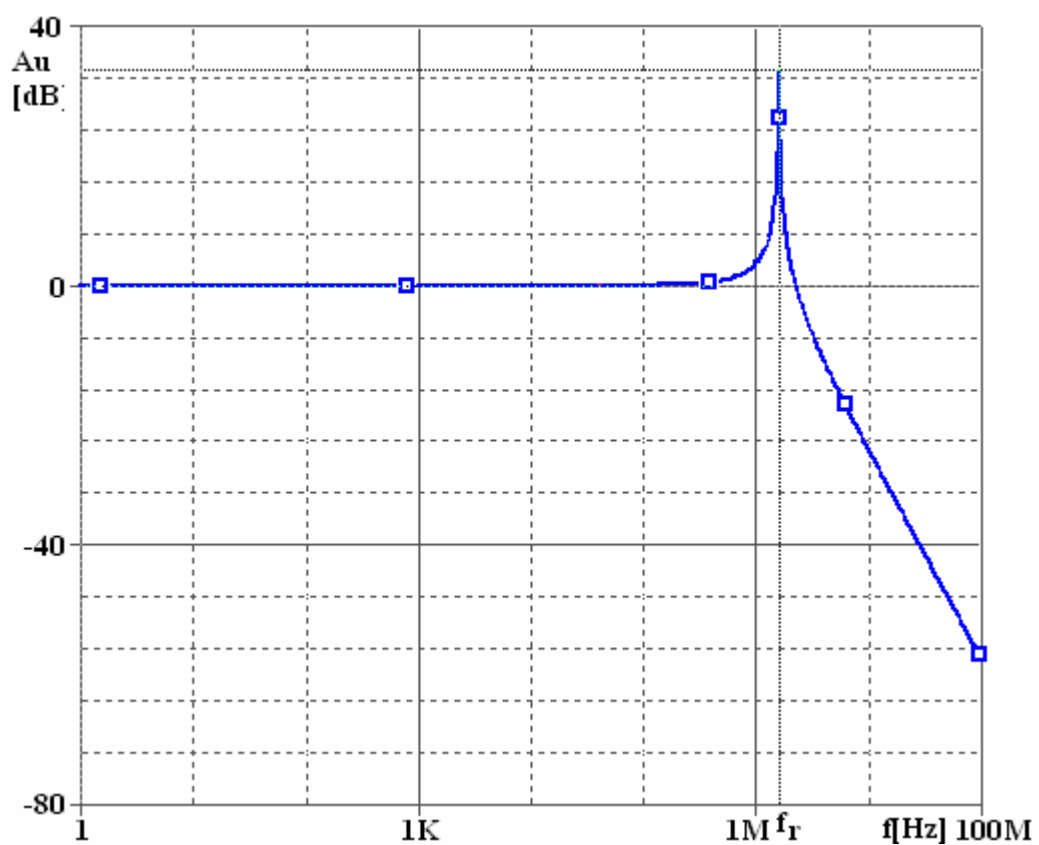
- tlumivkové- LC



Obr.3.2.3 Pasivní filtr typu LC [1]

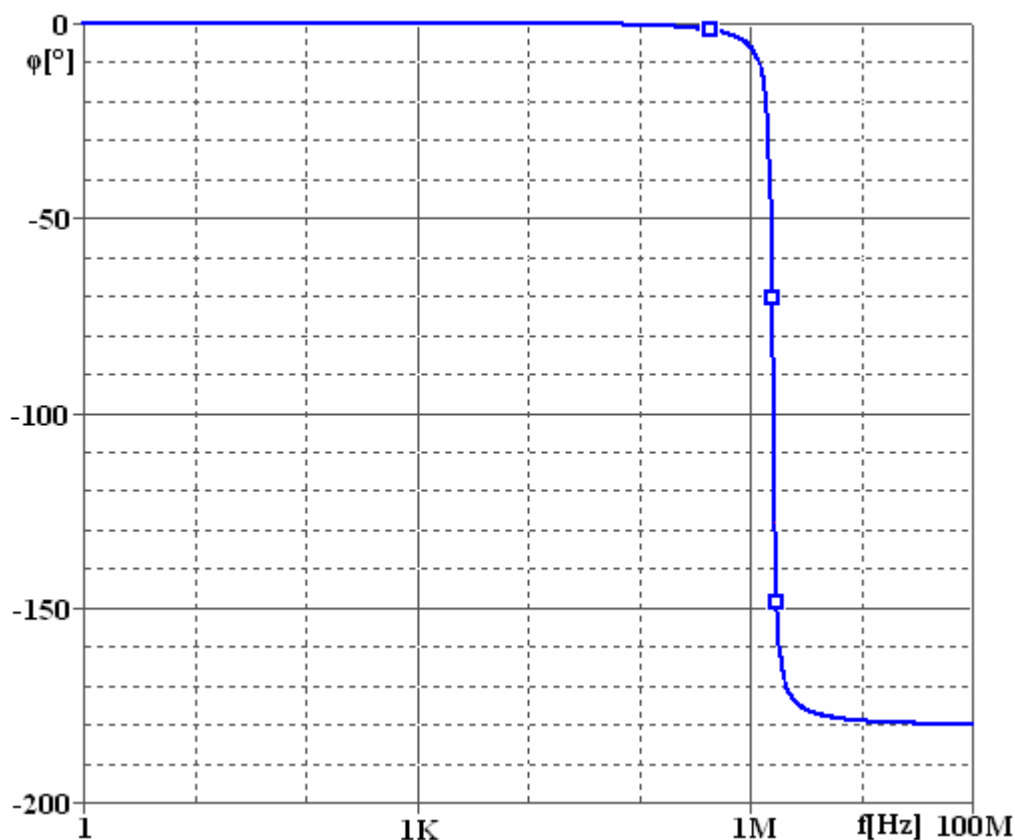
Výpočet rezonanční frekvence:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



Obr. 3.2.4 Amplitudová charakteristika pasivního filtru LC

Při vyšších kmitočtech se dává přednost pasivním filtrům LC. Výhodou těchto filtrů je poměrně velké potlačení střídavé složky, aniž by znatelně pokleslo usměrněné napětí, což je zapříčiněno tím, že je zde jen indukčnost a chybí tu odpor, na kterém by se ztrácel úbytek napětí. [1, 6]



Obr.3.2.5 Fázová charakteristika pasivního filtru LC

3.3 Analýza výsledků

Z výsledků simulací integračního članku, je vidět, že se RC člen chová jako dolnofrekvenční propust, kdy s narůstající frekvencí klesá výstupní napětí. Frekvence, při které začne výstupní napětí klesat a při které je také pokles o -3dB, se označuje jako kritická frekvence f_c . Jelikož tento integrační člen je filtr 1.řádu, má pouze jednu lomovou frekvenci,

která se vypočítá $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$. Z fázové charakteristiky lze také usoudit, že výstupní napětí je

fázově posunuto oproti vstupnímu napětí tzn., že výstupní napětí se opoždí za napětím vstupním. Tento fázový posuv se, se zvyšující frekvencí, narůstá až do hodnoty -90° . Při nízkých frekvencích, které dolnofrekvenční propust propouští, se kondenzátor neuplatňuje. Reaktance kondenzátoru je velká. Ovšem při vyšších kmitočtech, přesahující mezní frekvenci, se filtr začíná uplatňovat. Reaktance kondenzátoru je téměř malá a signál je zkratován. Tento pasivní filtr se dá také realizovat pomocí operačních zesilovačů, které jsou ale omezeny horním mezním kmitočtem použitého operačního zesilovače. Pomocí nich můžeme vytvářet, kaskádním zapojením, složitější filtry vyšších řádů.

Pasivní filtr LC je rezonanční obvod. Při tzv. rezonanční frekvenci f_r dochází u tohoto obvodu k rezonanci. Při tomto jevu se značně zvýší výstupní napětí a obvodem protéká minimální proud. Z tohoto lze usuzovat, že při rezonanční frekvenci je impedance maximální.

Na fázové charakteristice jde vidět, že fázový posuv, při rezonančním kmitočtu, mezi napětím a proudem je nulový. Při rezonanci, vycházíme z toho, že se kapacitní a induktivní reaktance

rovnají $X_C = X_L$. Poté se rezonanční frekvence se spočítá $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

4 Stabilizátor a regulátor stejnosměrného napětí

Jelikož většina elektronických obvodů vyžaduje pro správnou funkci konstantní stejnosměrné napětí ze zdroje napájení, je nutné aby za usměrňovačem a filtrem byl zařazen vhodný stabilizátor nebo regulátor napětí, protože výstupní napětí se může měnit z důsledku kolísání napájecí sítě. Stabilizátor napětí je obvod, který vyrovnává napětíové změny na spotřebiči. Nejjednodušší, tzv. parametrické stabilizátory se často používají u jednoduchých obvodů, které nevyžadují velkou přesnost stabilizace. [1, 3]

Stabilizátory můžeme rozdělit podle několika hledisek:

1.) *Podle zapojení*

- a) sériové
- b) paralelní

2.) *Podle řízení*

- a) parametrické
- b) zpětnovazební

3.) *Podle stabilizované veličiny*

- a) stabilizátory proudu
- b) stabilizátory napětí

[9]

Základní veličiny stabilizátoru jsou charakterizovány činitelem stabilizace S a vnitřním odporem stabilizátoru R_i . Činitel stabilizace je definován vztahem:

$$S \equiv \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \frac{U_2}{U_1} \quad \text{pro } R_z = \text{konst.} \quad [1]$$

Vnitřní odpor stabilizátoru je definován vztahem:

$$R_i \equiv \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} \quad \text{pro } U_1 = \text{konst.} \quad [1]$$

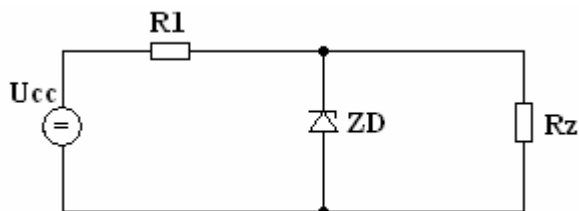
4.1 Parametrický stabilizátor se Zenerovou diodou

Parametrické stabilizátory využívají vhodného průběhu voltampérových charakteristik některých součástek, stabilizátory se zpětnou vazbou obsahují regulační součástku, která je ovládaná odchylkou výstupního napětí od hodnoty referenčního napětí. [10]

Funkce těchto stabilizátorů je založena na principu možného rozdílu mezi stejnosměrným a dynamickým odporem stabilizačního prvku v pracovním bodě. Pokud je dynamický odpor

v pracovním bodě mnohem menší než stejnosměrný, jedná se o parametrický stabilizátor napětí. Pokud je rozdíl opačný tj. dynamický odpor v pracovním bodě stabilizačního prvku je mnohem větší než stejnosměrný, jedná se o parametrický stabilizátor proudu. [10]

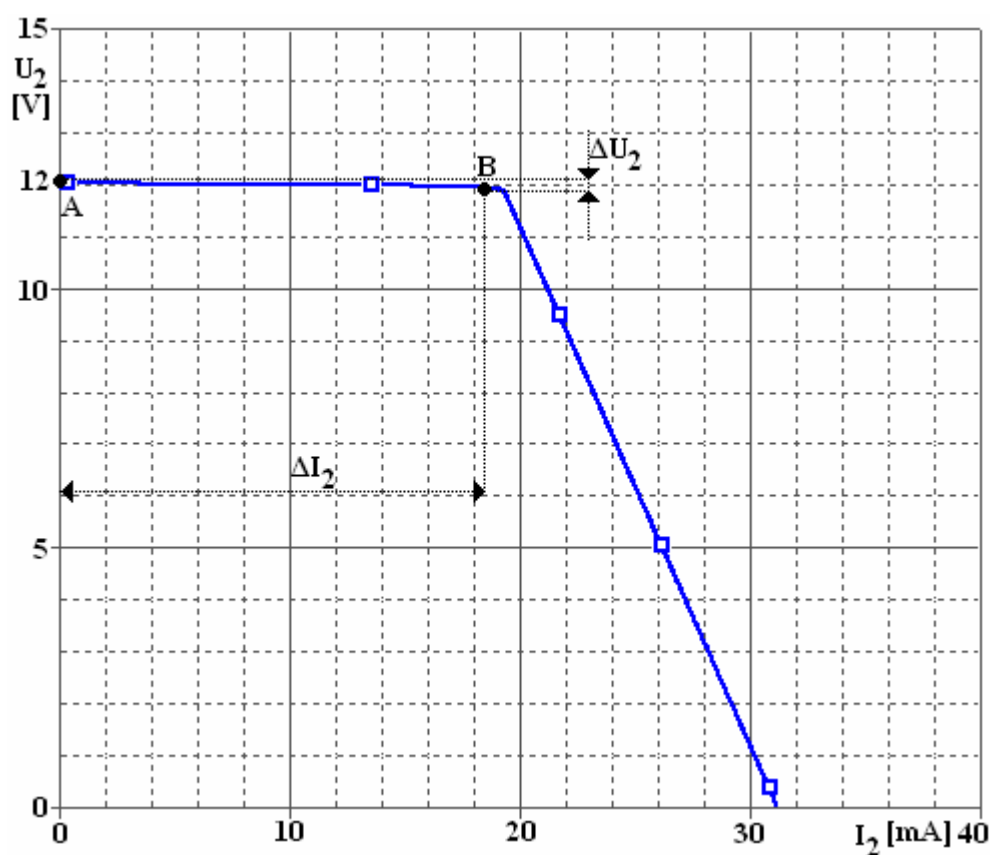
Parametrický stabilizátor se Zenerovou diodou využívá průběhu voltampérové charakteristiky v závěrném směru, Zenerova jevu. Velkou výhodou těchto stabilizačních diod je relativně velký počet možných Zenerových napětí, neboli napětí, která jsou na výstupu ze stabilizačního obvodu. [10]



Obr.4.1.1 Parametrický stabilizátor se Zenerovou diodou[1]

Při návrhu stabilizátoru vycházíme ze zadaných hodnot vstupního napětí $U_1 \pm \Delta U$, výstupního napětí U_2 a rozpětí zatěžovacích proudů $I_{2\text{MIN}}$ a $I_{2\text{MAX}}$. Zenerovu diodu volíme podle maximálního proudu diodou, maximálního ztrátového výkonu a Zenerova napětí ($U_Z = U_2$). Pro zajištění správné funkce stabilizátoru je nutné, aby při minimálním napětí na vstupu a při maximálním odběru $I_{2\text{MAX}}$ proud tekoucí diodou nebyl menší než $0,2 \cdot I_{Z\text{MAX}}$, a naopak při maximálním napětí na vstupu stabilizátoru a minimálním odběru $I_{2\text{MIN}}$ nesmí být překročen maximální proud Zenerovou diodou $I_{Z\text{MAX}}$. [1, 10]

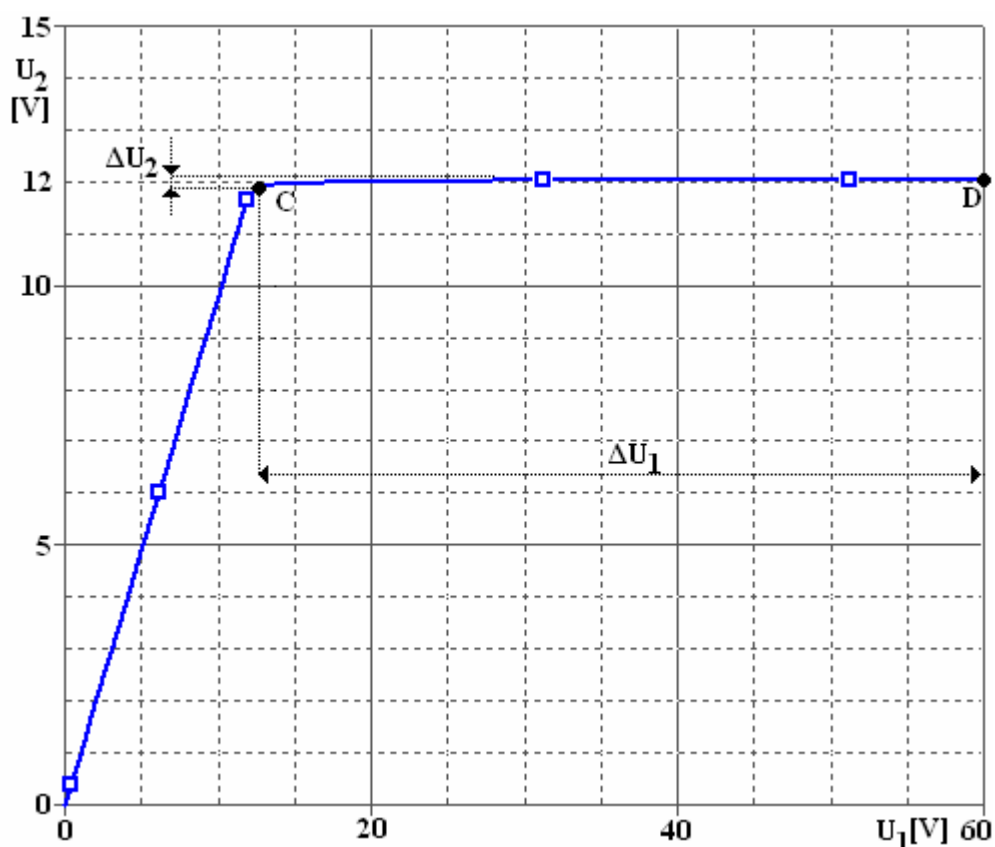
Velikost výstupního napětí je také ovlivňována teplotou okolí, přičemž změna je dána teplotním koeficientem diody. Vliv teploty můžeme částečně eliminovat sériovým zapojením diody v propustném směru se Zenerovou diodou. Pro zvýšení činitele stabilizace je možné použít kaskádní zapojení dvou parametrických stabilizátorů. Požadujeme-li větší proudový odběr z parametrického stabilizátoru je výhodné na výstup stabilizátoru připojit emitorový sledovač. [1]



Obr.4.1.2 Výstupní charakteristika stabilizátoru se Zenerovou diodou

Pracovní oblast stabilizace napětí leží mezi body A a B, kterou můžeme vidět na výstupní charakteristice stabilizátoru se Zenerovou diodou zobrazenou na obr.4.1.2 [4]

Rozsah velikosti vstupního napětí U_1 , při kterém je ještě stabilizátor schopen při daném zatížení dodržet s danou přesností velikost výstupního napětí U_2 , nazýváme pracovní oblastí stabilizátoru. Na obr.4.1.3 se nachází mezi body C a D. [4]



Obr.4.1.3 Převodní charakteristika stabilizátoru se Zenerovou diodou

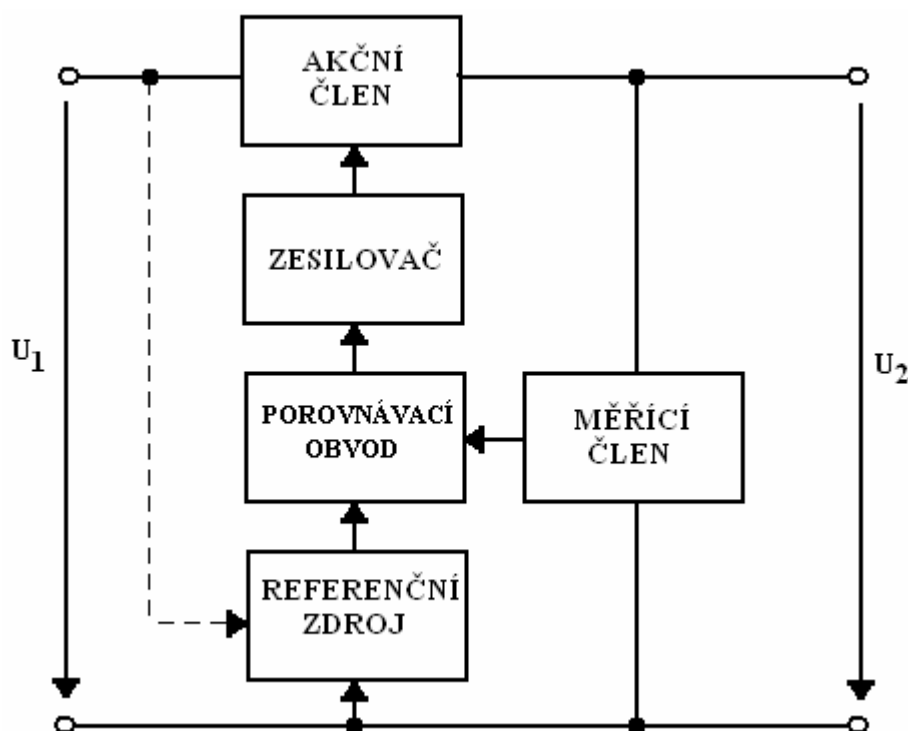
Parametrické stabilizátory mají řadu nevýhod, ke kterým patří:

- vnitřní odpor stabilizátoru je závislý na typu použité Zenerovy diody
- při proměnném proudovém odběru klesá činitel stabilizace S na velmi nízkou hodnotu
- výstupní napětí nelze regulovat
- velikost maximálního výstupního proudu je závislá na maximálním proudu Zenerovy diody
- na odporu R_1 se ztrácí velký výkon [1]

4.2 Regulátor stejnosměrného napětí

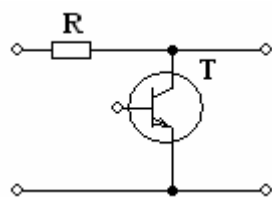
V náročnějších aplikacích se používají elektronické regulátory stejnosměrného napětí, což jsou v podstatě obvody se zesilovačem a zápornou zpětnou vazbou. Tyto zařízení jsou velice citlivá na proudová přetížení, protože vnitřní odpor regulátorů napětí je velmi malý. Z tohoto důvodu jsou regulátory vybaveny elektronickou proudovou ochranou. Regulátory dělíme z hlediska provozu na:

- regulátory se spojitým provozem (proporcionální)
- regulátory s nespojitým provozem (impulsní) [1]

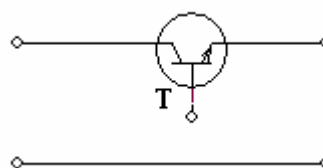


Obr.4.2.1 Blokové schéma regulátoru s nespojitým provozem - sériový regulátor napětí [1]

Základní princip spojitého regulátoru stejnosměrného napětí spočívá v tom, že porovnává velikost výstupního napětí s napětím tzv. referenčního zdroje. Vzniklá odchylka se zesiluje a převádí na akční člen, který řídí velikost napětí tak, aby odchylka žádané hodnoty napětí od skutečné byla minimální. Akčním členem bývá nejčastěji výkonový bipolární tranzistor, který pracuje v aktivní oblasti jako proměnný odpor. Výkonový tranzistor je možné zapojit buď paralelně nebo sériově. [1]



Obr.4.2.2 Paralelní regulátor [1]

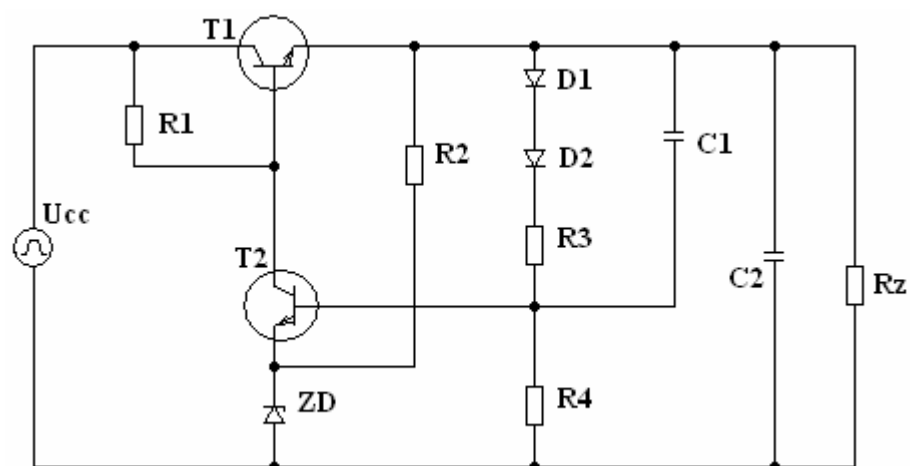


Obr.4.2.3 Sériový regulátor [1]

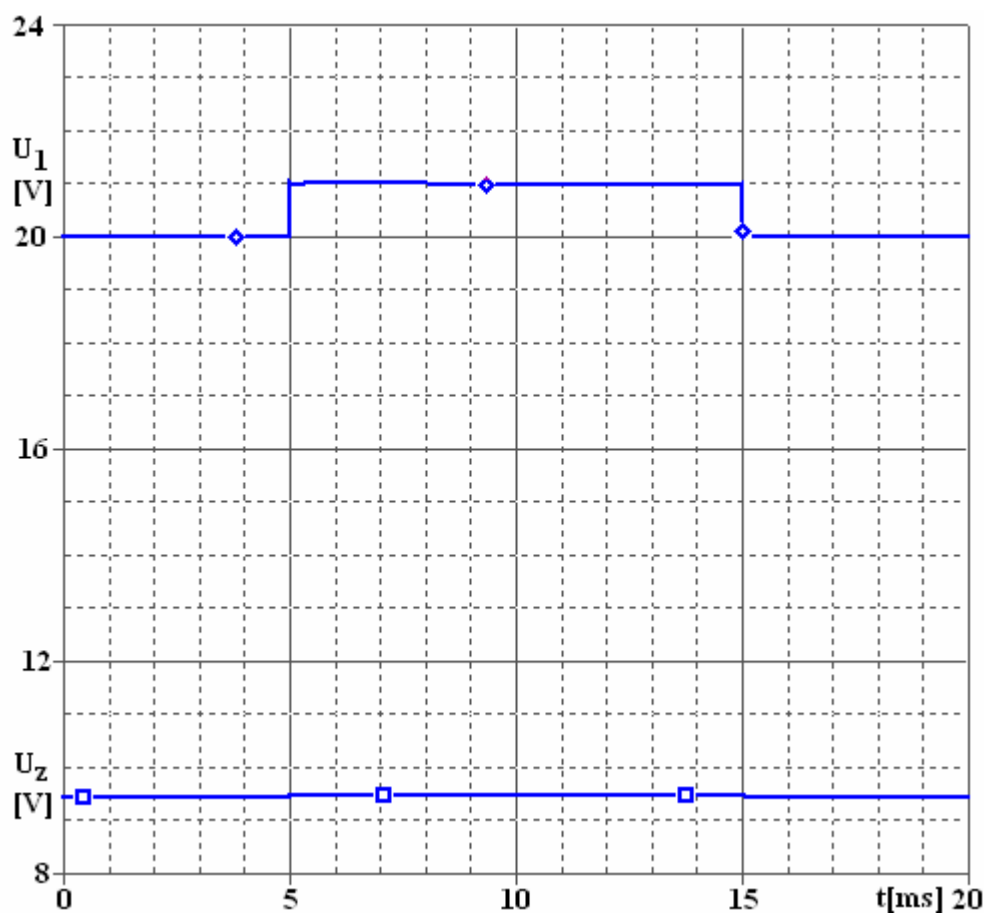
Podstatně výhodnější z hlediska účinnosti a regulačních vlastností je zapojení sériového regulátoru, který se používá mnohem častěji než paralelní regulátor. Jeho nevýhodou je minimální odolnost vůči zkratu na výstupu. [1]

4.2.1 Sériový regulátor stejnosměrného napětí

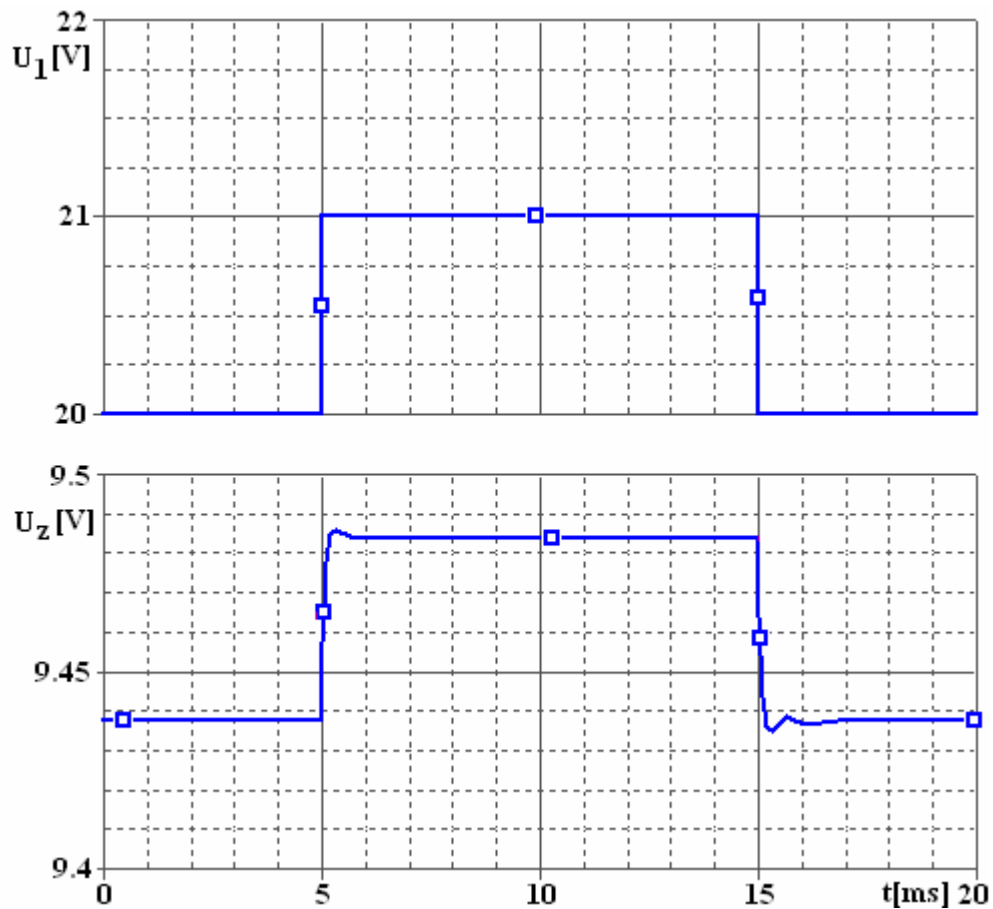
Dělič, tvořený rezistory R_3 a R_4 , představuje měřicí člen, parametrický stabilizátor zde představuje rezistor R_2 . Referenční zdroj je tvořen Zenerovou diodou, tranzistor T_2 je zde ve funkci porovnávacího obvodu se zesilovačem odchylky a T_1 zde zastupuje akční člen.



Obr.4.2.4 Základní zapojení sériového regulátoru napětí [1]



Obr.4.2.5 Průběh činnosti sériového regulátoru napětí



Obr.4.2.6 Detail průběhu činnosti sériového regulátoru napětí

Při návrhu spojitého regulátoru se držíme následujících kroků:

Zadány jsou: $U_1 \pm \Delta U, U_2, I_{2MAX}, R_i$

$$U_1 = 20V \pm 1V, U_2 = 9,4V, I_{2MAX} = 10mA$$

- 1) návrh referenčního zdroje

$$U_z = 0,5 \cdot U_2 \rightarrow \text{typ Zenerovy diody } (I_{ZOPT}, U_z, R_{dZ})$$

$$U_z = 0,5 \cdot 9,4 = 4,7V \rightarrow \text{typ BZX84C4V7 } (I_{ZOPT} = 5mA, U_z = 4,7V)$$

- 2) volba I_{C2}

$$I_{C2} = \frac{I_{ZOPT}}{2} = I_{E2}$$

$$I_{C2} = \frac{5mA}{2} = 2,5mA = I_{E2}$$

- 3) výběr $T_2 \rightarrow U_{CE0}, h_{21eT2}, U_{BE0}, I_{CMAX}$

$$BC546B \rightarrow h_{21e} = 330$$

- 4) výpočet proudu I_P , odporu R_2

$$I_P = I_{ZOFT} - I_{E2} = 5mA - 2,5mA = 2,5mA$$

$$R_2 = \frac{U_2 - U_Z}{I_P} = \frac{9,4 - 4,7}{2,5mA} = 1880\Omega$$

- 5) výpočet proudu báze T_2

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{h_{21eT2}} = \frac{2,5mA}{330} = 7,5\mu A$$

- 6) volba proudu děličem napětí R_3 , R_4

$$I_D > 10 \cdot I_{B2} \Rightarrow I_D = 10 \cdot 7,5\mu A = 75\mu A$$

- 7) výpočet napětí děliče

$$U_D = U_Z + U_{BE2} = 4,7 + 0,7 = 5,4V$$

- 8) výpočet R_3 , R_4

$$R_3 = \frac{U_2 - U_D}{I_D + I_{B2}} = \frac{9,4 - 5,4}{75\mu A + 7,5\mu A} = 48484\Omega$$

$$R_4 = \frac{U_D}{I_D} = \frac{5,4}{75\mu A} = 72k\Omega$$

- 9) výběr T_1

$$P_Z = (U_1 - U_2)I_{2MAX} < P_{CMAX}$$

$$T_1 \rightarrow U_{CE0}, \beta_1 = h_{21eT1}, I_{BMAX}, I_{CMAX}$$

- 10) výpočet bázevého proudu I_{B1}

$$I_{B1} = \frac{I_{2MAX} + I_P + I_D}{h_{21eT1}} = \frac{10mA + 2,5mA + 75\mu A}{330} = 38,1\mu A$$

- 11) výpočet proudu rezistorem I_{R1}

$$I_{R1} = I_{B1} + I_{C2} = 38,1\mu A + 2,5mA = 2,538mA$$

- 12) výpočet R_1

$$R_1 = \frac{U_1 - \Delta U - (U_{BE1} + U_2)}{I_{R1}} = \frac{20 - 1 - (0,7 + 9,4)}{2,538mA} = 3506,698\Omega \quad [1]$$

4.3 Analýza výsledků

Stabilizátor napětí, jak už název vypovídá, se využívá pro jeho vlastnost, kdy při změnách vstupního napětí udržuje výstupní napětí na konstantní hodnotě. Jak je vidno z převodní

charakteristiky, tak stabilizátor, se při zvyšujícím rozsahu velikosti vstupního napětí, je schopen udržet výstupní napětí na zvolené hodnotě výstupního napětí. Jinak řečeno, při velké odchylce vstupního napětí je malá odchylka výstupního napětí. V grafech jsou vyznačeny pracovní oblasti ve kterých stabilizátor udržuje výstupní napětí na konstantní hodnotě. Tento stabilizátor využívá voltampérové charakteristiky Zenerovy diody v závěrném směru. Vlivem strmé charakteristiky je změna výstupního napětí malá. Výhodou tohoto stabilizátoru je, že máme velký rozsah Zenerových diod, tudíž, velký rozsah Zenerových napětí.

Dalším stabilizačním obvodem je sériový regulátor stejnosměrného napětí, který plní stejnou funkci jako stabilizátor napětí. Ze simulačního výstupu, lze vidět, jak regulátor pracuje. Při vstupním napětí U_1 je napětí na výstupu regulováno na konstantní hodnotu U_Z . Pokud se ovšem vyskytne nějaká změna napětí ΔU_1 , tak regulátor na tuto změnu reaguje nepatrnou změnou napětí na výstupu, díky tomu, že regulátor porovnává velikost napětí na výstupu s napětím referenčního zdroje, přičemž odchylka žádané hodnoty od skutečné je minimální.

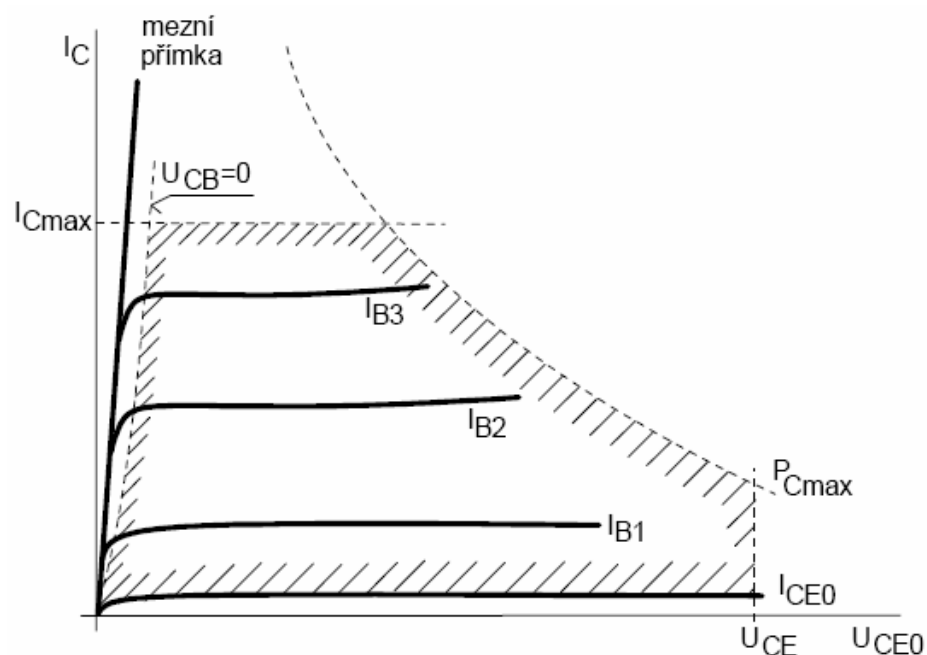
5 Tranzistorové zesilovače

Zesilovače jsou elektronická zařízení, jejichž úlohou je zesílit vstupní (budící) signál. Obecně patří zesilování signálů k nejběžnějším a nejčastějším operacím se signály. Na zesilovač můžeme nahlížet jako na dvojbran, který zesiluje vstupní signál. Zesilovače jsou téměř součástí každého elektronického zařízení. [3, 4]

Obecně lze zesilovače elektrického signálu rozdělit podle několika hledisek:

- 1) podle použitých zesilovacích prvků – elektronkové, polovodičové
 - 2) podle výkonu odebíraného z výstupu – předzesilovače, budící zesilovače, výkonové zesilovače
 - 3) podle kmitočtu elektrického signálu – nízkofrekvenční, vysokofrekvenční
 - 4) podle šířky pásma kmitočtu elektrického signálu – úzkopásmové, širokopásmové
 - 5) podle polohy klidového pracovního bodu – třídy A, B, AB, C
 - 6) podle závislosti mezi vstupním a výstupním signálem – lineární, nelineární
 - 7) podle druhu zesilovacích elektrických signálů – napětíové, proudové, výkonové
- [1]

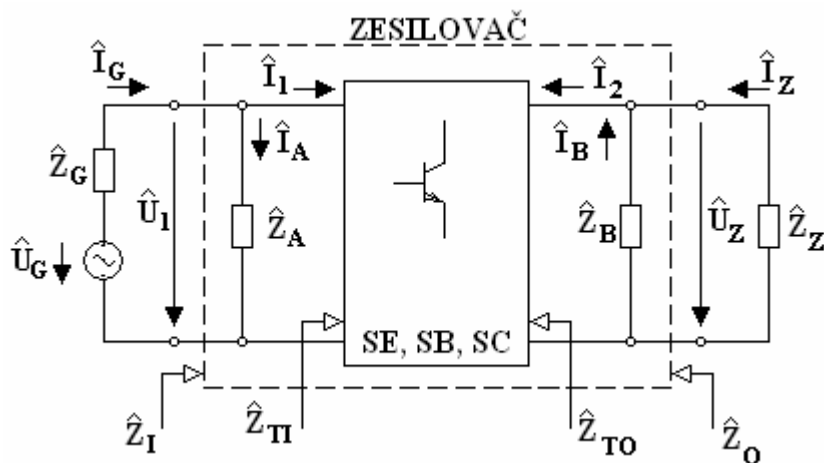
U tranzistorových zesilovačů lze tranzistor zapojit třemi základními způsoby: se společným emitorem, se společnou bází, se společným kolektorem. Tzn., že mají společný např. emitor s pevně danou zemí. Nejčastěji je používáno zapojení se společným emitorem, jelikož jako jediné zapojení zesiluje napětí a proud. A má proto největší výkonové zesílení. Aby tranzistor mohl pracovat jako aktivní prvek, musí jeho klidový pracovní bod ležet v aktivní oblasti. Aktivní oblast tranzistoru v zapojení se společným editorem je definována v síti výstupních charakteristik, která je vymezena maximálním napětím U_{CE} , maximálním kolektorovým proudem $I_{C_{MAX}}$, zbytkovým proudem I_{CEO} , který teče při proudu báze $I_B = 0$, a maximální kolektorovou ztrátou $P_{C_{MAX}}$. [1, 3]



Obr.5.1 Aktivní oblast tranzistoru [1]

5.1 Základní vlastnosti zesilovačů

Mají-li být vlastnosti jednoznačně definovány, musíme zesilovač uvažovat za uzavřenou obvodovou soustavu se zdrojem signálu o vnitřní impedanci \hat{Z}_G a napětí \hat{U}_G a se zátěží o impedanci \hat{Z}_Z . [1]



Obr.5.1.1 Ideové schéma tranzistorového zesilovače se zdrojem signálu a zátěží [1]

Zesilovač bývá nejčastěji charakterizován třemi parametry, což jsou napěťové zesílení nebo případně proudové zesílení, vstupní a výstupní impedancí.

Napět'ové zesílení je definováno jako podíl výstupního napětí a vstupního napětí. Je to poměrová veličina. Nejčastěji se napět'ové zesílení uvádí jako $A_U = \frac{U_Z}{U_G}$.

a nebo jako napět'ový zisk v decibelech $A_U = 20 \log \left(\frac{U_Z}{U_G} \right)$.

Zesilovač můžeme také charakterizovat proudovým zesílením $A_I = \frac{I_Z}{I_G}$.

A nebo také jako proudový zisk $A_I = 20 \log \left(\frac{I_Z}{I_G} \right)$.

Vstupní impedance \hat{Z}_I je dána paralelní kombinací impedance \hat{Z}_{TI} a impedance \hat{Z}_A . Tedy $Z_I = \frac{Z_{TI} \cdot Z_A}{Z_{TI} + Z_A}$.

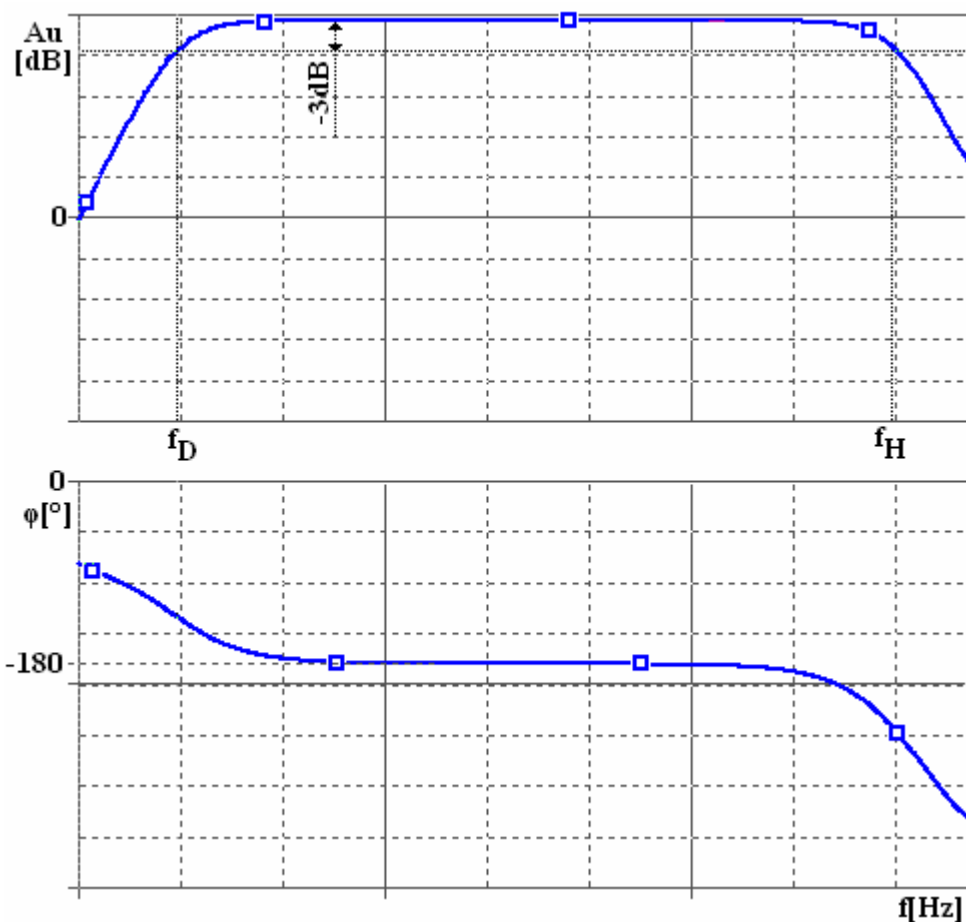
Impedance \hat{Z}_{TI} je definována jako podíl $Z_{TI} = \frac{U_1}{I_1}$.

Výstupní impedance \hat{Z}_O je definována obdobně jako impedance vstupní, tedy jako paralelní kombinace impedance \hat{Z}_{TO} a impedance \hat{Z}_B . Tedy $Z_O = \frac{Z_{TO} \cdot Z_B}{Z_{TO} + Z_B}$.

Impedance \hat{Z}_{TO} je definována jako podíl $Z_{TO} = \frac{U_Z}{I_Z}$.

Napět'ové zesílení stejně jako přenos jsou obecně komplexními veličinami a jsou tedy kmitočtově závislé. Kmitočtovou závislost vyjadřujeme pomocí kmitočtových charakteristik: [1, 3]

- a) amplitudová
- b) fázová



Obr.5.1.2 Kmitočtové charakteristiky zesilovače a) amplitudová b) fázová

Z průběhu amplitudové charakteristiky můžeme vyznačit tři charakteristické oblasti:

- a) dolní kmitočtové pásmo
- b) střední kmitočtové pásmo
- c) horní kmitočtové pásmo

Přenosové pásmo zesilovače se nejčastěji definuje poklesem zesílení o 3 dB oproti zesílení při určitém kmitočtu středního pásma, což vyznačuje šířku pásma, která je definována rozdílem frekvencí f_D a f_H . Z kmitočtových charakteristik lze usoudit, že se zesilovač chová jako pásmová propust'. [3]

5.2 Nastavení a stabilizace klidového pracovního bodu

Pracovní bod se nejčastěji nastavuje a stabilizuje pomocí těchto obvodů:

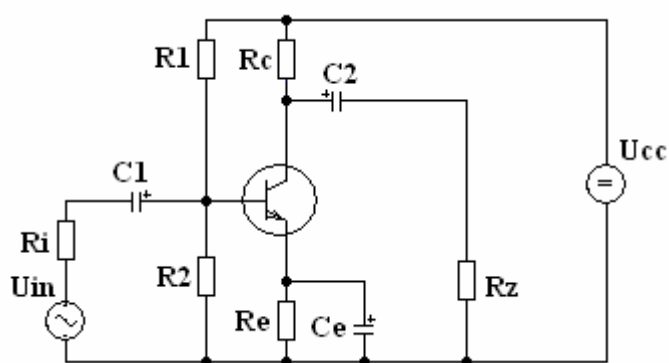
5.2.1 Obvody se zápornou zpětnou vazbou

- a) proudová sériová záporná zpětná vazba
- b) napěťová paralelní vazba

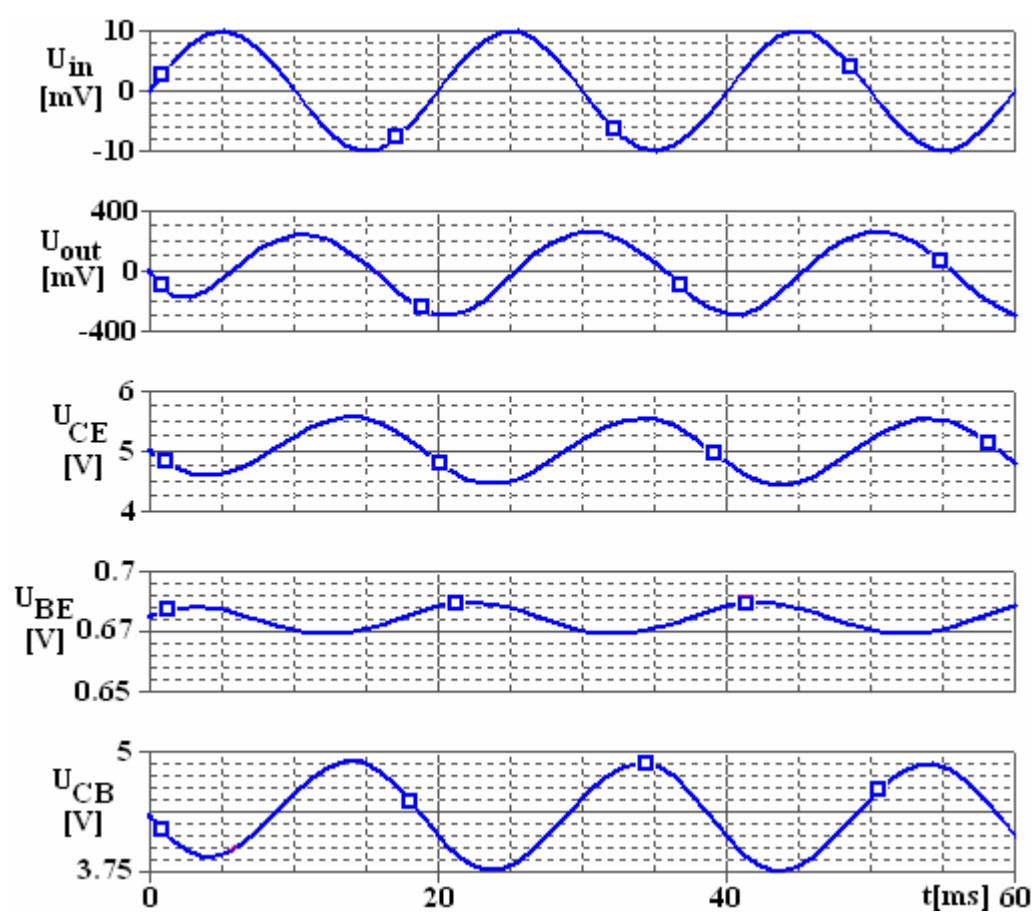
Použitím záporných zpětných vazeb se nejčastěji nastavuje a stabilizuje pracovní bod tranzistoru. Od jednoduchých obvodů se liší tím, že je připojen emitorový rezistor R_E , který v obvodu znamená stejnosměrnou proudovou sériovou zápornou zpětnou vazbu. Slouží ke stabilizaci pracovního bodu. Dojde-li ke zvýšení teploty, proud procházející kolektorem se zvýší. To také způsobí zvýšení emitorového proudu na rezistoru R_E na kterém se také zvedá úbytek napětí $U_{RE} = R_E I_E$. Napětí na bázi – emitoru U_{BE} se zmenší a tím se také zmenší teplota. K rezistoru R_E je paralelně připojen kondenzátor C_E , který zde slouží jako filtr pro střídavé (parazitní) složky. [1, 11]

5.3 Jednostupňový zesilovač

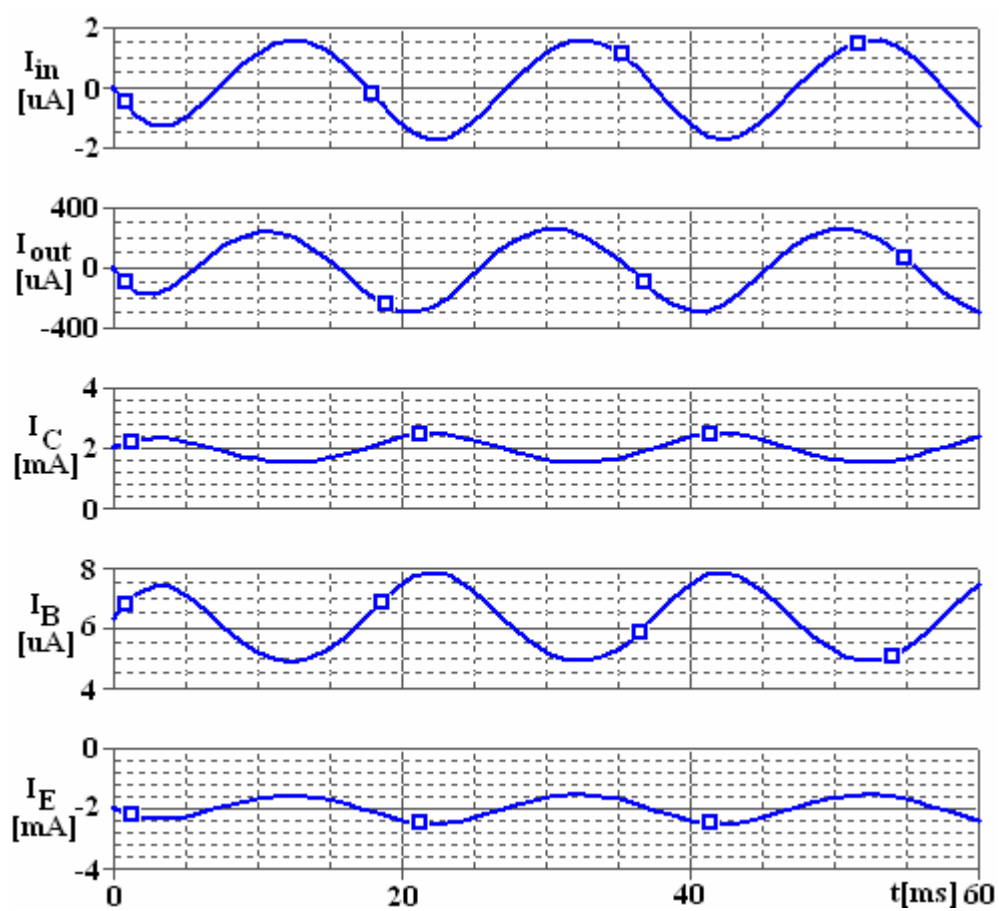
Vůbec nejčastěji používaným zapojením je zapojení se společným emitorem. Klidové hodnoty proudů I_{BP} , I_{CP} , I_{EP} a hodnota napětí U_{CE} jsou určeny hodnotami rezistorů R_E , R_C , R_2 , které nastavují a stabilizují klidový pracovní bod, a také napájecím napětím U_{CC} . Kondenzátory C_1 a C_2 jsou oddělovací kondenzátory, které slouží k oddělení zdroje budícího signálu a zátěže od napětí báze a kolektoru tranzistoru. Rezistor R_E je doplněn kondenzátorem C_E , který je zde proto, aby se při zpracování střídavého signálu neovlivnilo zesílení zesilovacího stupně stejnosměrnou zpětnou vazbou. [1]



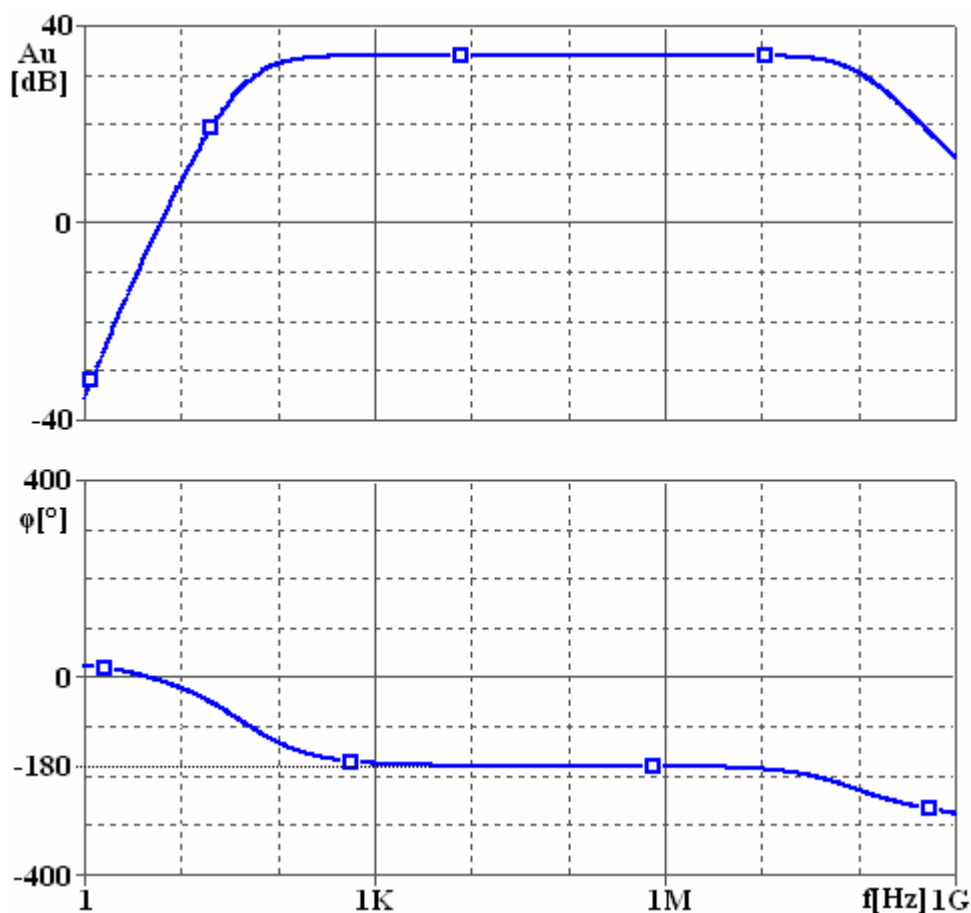
Obr.5.3.1 Zesilovač v zapojení se společným emitorem [1]



Obr.5.3.2 Průběhy jednotlivých napětí na tranzistoru, vstupní napětí, výstupní napětí



Obr.5.3.3 Průběhy jednotlivých proudů na tranzistoru, vstupní proud, výstupní proud



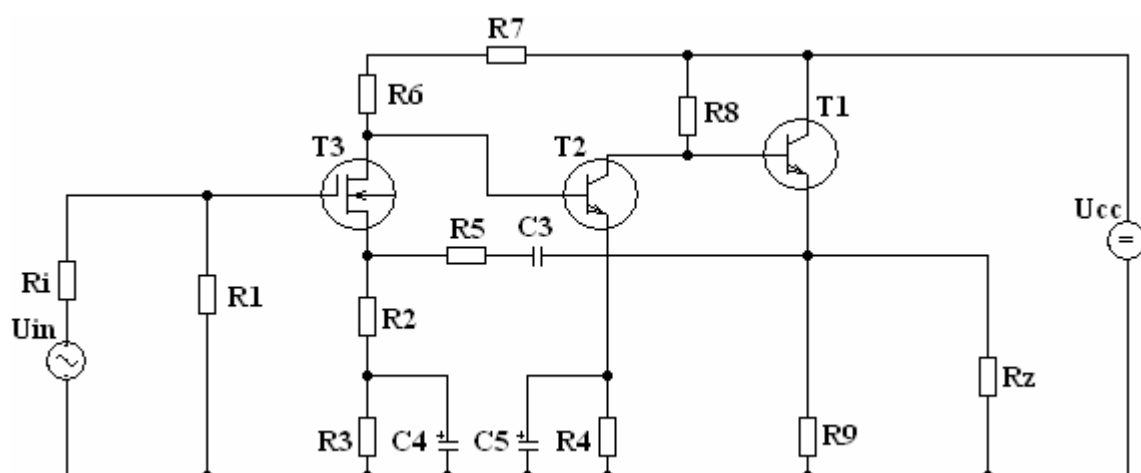
Obr.5.3.4 Amplitudová a fázová charakteristika

5.4 Vícetupňové zesilovače

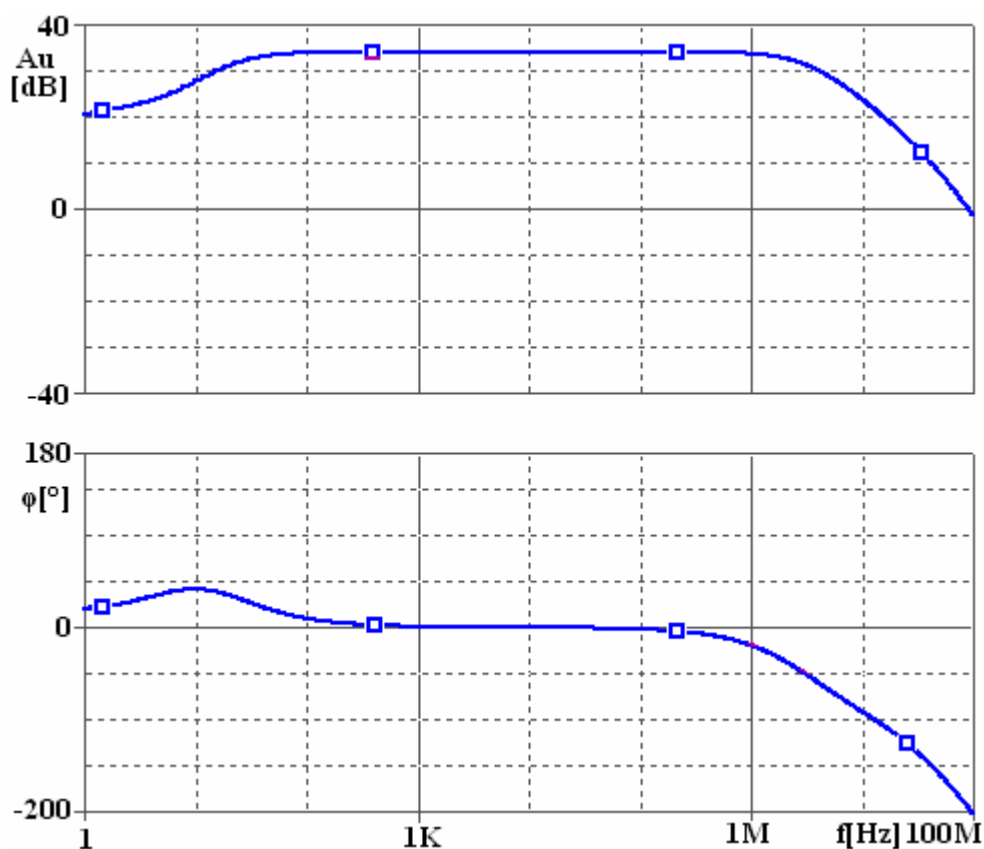
5.4.1 Třístupňový zesilovač

Abychom získali větší zesílení, než které poskytuje jeden zesilovací stupeň, můžeme zapojit více zesilovacích stupňů za sebou (do kaskády). Výstup prvního zesilovacího stupně je navázán na vstup druhého zesilovacího stupně. Tyto stupně jsou vázány vazbami. Rozlišujeme dva základní druhy vazeb:

- 1) stejnosměrná
- 2) střídavá



Obr.5.4.1 Třístupňový zesilovač [1]

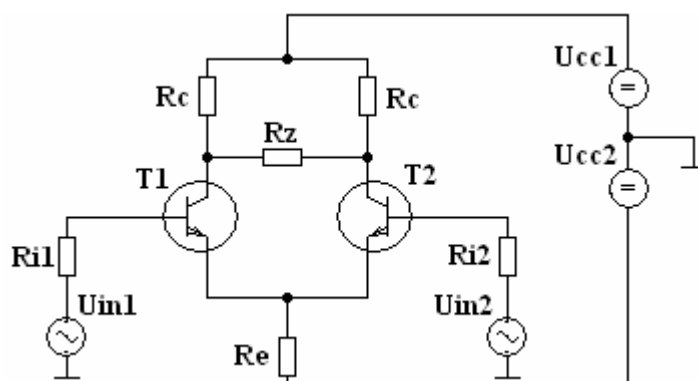


Obr.5.4.2 Amplitudová a fázová charakteristika

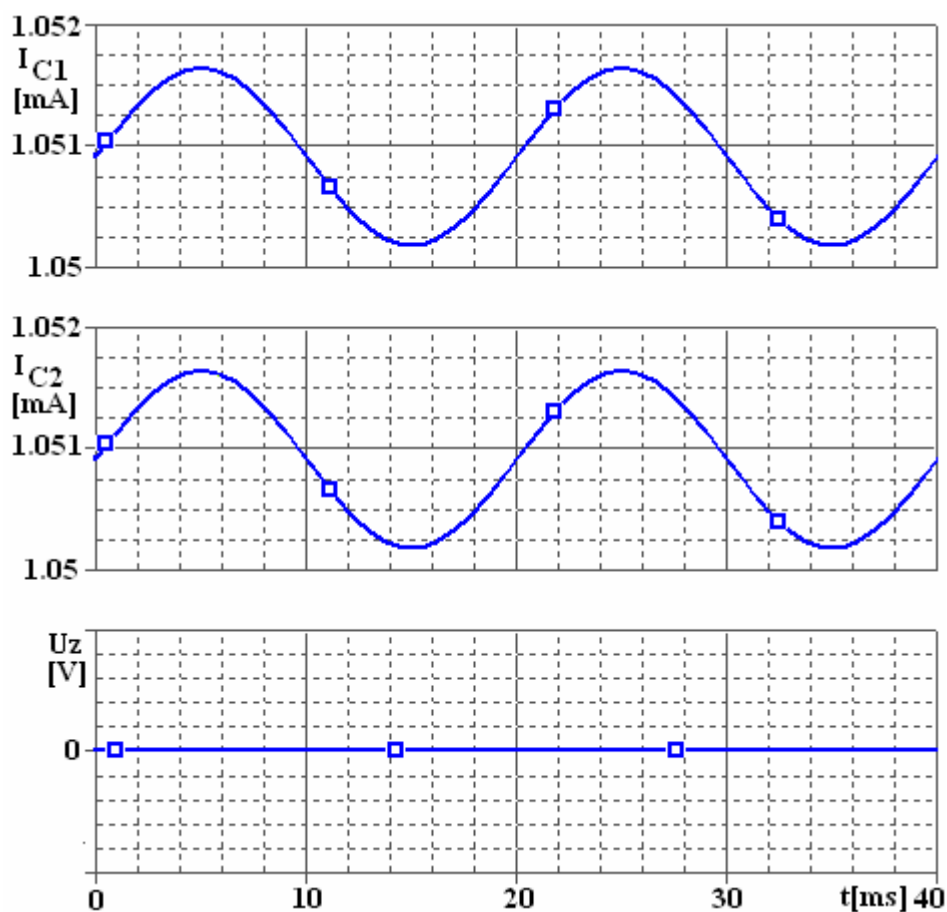
5.5 Rozdílový (diferenční) zesilovač

Nejzákladnější vlastností diferenčního zesilovače je, že reaguje na rozdíl signálu na jeho vstupech a tyto signály zesílí, a necitlivost vůči souhlasnému signálu. Jestliže budeme uvažovat, že oba tranzistory T_1 a T_2 jsou shodné a rezistory R_C a R_C se rovnají, tak při shodném básovém napětí U_1 a U_2 jsou shodné kolektorové proudy. Pak je výstupní napětí nulové. Při

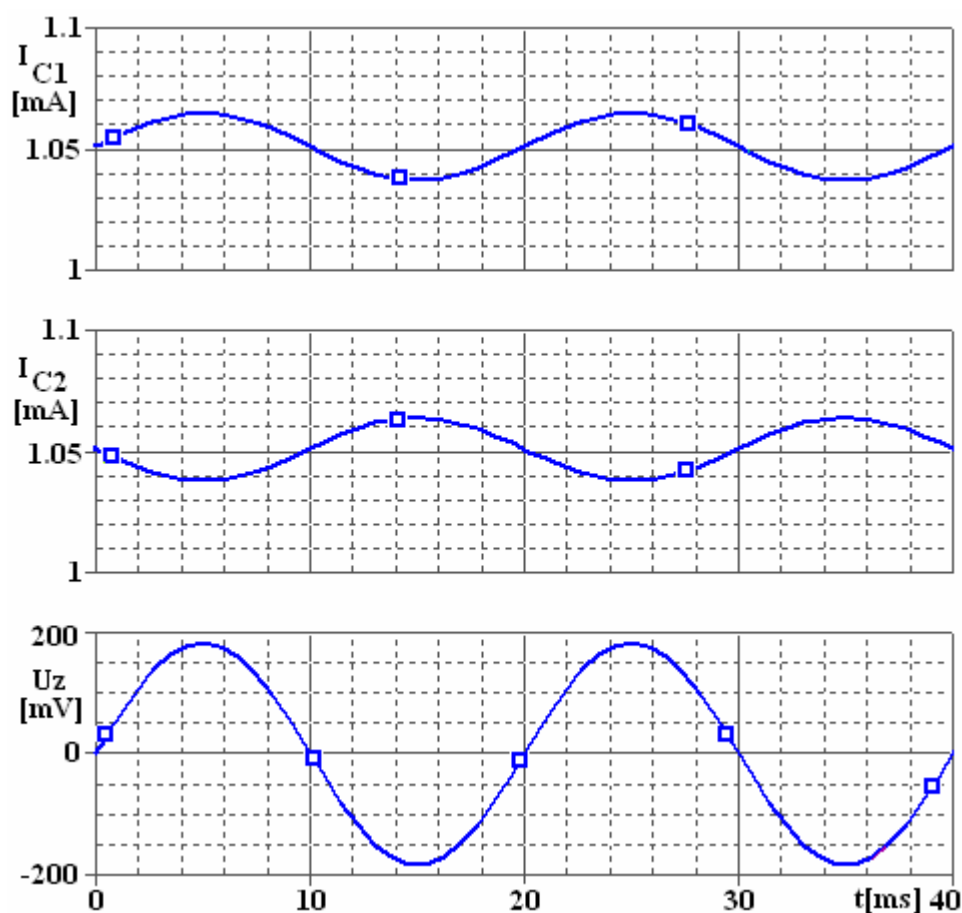
nesouhlasném signálu se na jednom z tranzistorů zvýší kolektorový proud a na druhém poklesne. Na zátěži je nenulové napětí.



Obr.5.5.1 Základní zapojení diferenčního zesilovače [1]



Obr.5.5.2 Průběhy kolektorových proudů a napětí na zátěži při souhlasném napětí



Obr.5.5.3 Průběhy kolektorových proudů při nesouhlasném napětí

Důležitým parametrem diferenčních zesilovačů je činitel potlačení souhlasného napětí CMRR. Činitel potlačení je určen proudovým zesilovacím činitelem h_{21E} a velikostí společného emitorového odporu R_E . Zvýšení hodnoty CMRR dosáhneme použitím Darlingtonova zapojení a použitím proudového zdroje namísto emitorového odporu R_E . Čím je činitel potlačení souhlasného napětí vyšší, tím je zesilovač kvalitnější.

5.6. Analýza výsledků

Základním znakem zesilovače je zesílit vstupní signál. Zesílení závislé na frekvenci udává frekvenční charakteristika zesilovače. Z tvaru charakteristik lze usoudit, že zesilovač se chová jako pásmová propust. Šířka pásma zesilovače se nejčastěji určuje poklesem zesílení o 3dB oproti zesílení uprostřed středního kmitočtového pásma. Díky záporné zpětné vazbě se šířka pásma zesilovače zvětšuje. Pomocí ní se také nastavuje pracovní bod zesilovače. Bohužel, ale zmenšuje zesílení. V simulaci se jedná o zesilovač v zapojení se společným emitorem. Toto zapojení je nejvíce používané, protože zesiluje jak napětí tak i proud. Z fázové charakteristiky jde vidět, že toto zapojení obrací fázi o 180° . Pomocí obvodu se stejnosměrnou proudovou sériovou zápornou zpětnou vazbou s děličem napětí nastavují klidový pracovní bod a od toho se odvíjí i příslušné proudy a napětí., které lze vidět na Obr.5.3.2 a Obr.5.3.3.

Pokud chceme zvětšit zesílení, zapojují se zesilovací stupně do kaskády., kde na výstup zesilovacího stupně je napojen vstup dalšího zesilovacího stupně.

Základní funkcí diferenciálního zesilovače je, že zesiluje rozdíl signálů na jeho vstupech. Z Obr.5.5.2 a Obr.5.5.3 je vidět zřejmá funkce. Při stejném napětí jeho vstupech se proud rozdělí na polovinu. Takže stejný proud teče jak odpory tak i tranzistory. Ovšem pokud se na vstupech objeví rozdílné napětí, diferenciální zesilovač tento rozdíl zesílí.

6 Závěr

Úkolem mé bakalářské práce bylo ověření teoretických předpokladů u vybraných typů elektronických obvodů. Pomocí programu OrCad – Pspice jsem měl vytvořit simulační modely, již zmíněných elektronických obvodů a zobrazit jejich grafické výstupy.

Nejdříve jsem se zabýval teoretickým rozbořem každého elektronického obvodu. Tyto obvody můžeme považovat za nedílnou součásti každého elektrického přístroje nebo zařízení. Tyto obvody slouží lidstvu od nepaměti. Žijeme v 21. století a člověk, aniž by si to uvědomoval, se s elektronikou střetává na každém kroku a právě proto elektronika zasahuje i do jiných oblastí jako je např. strojírenství, lékařství, vesmírný program atd. A proto je jejich využití a důležitost tak velká.

Poté je práce zaměřena na samotné vytváření simulačních modelů a jejich následné vyzkoušení v programu OrCad – Pspice. Jak můžeme vidět v samotné práci, vyzkoušel jsem si zadaná zapojení a jejich funkčnost jsem doložil grafickými zobrazeními, které jsou pro dané obvody charakteristické. I napříč problémům, které se v simulacích stávají, tyto simulace byly úspěšné a jejich funkčnost je tím ověřená.

Dalším vývojem projektu je možnost provedení simulací dalších elektronických obvodů, které jsou nepostradatelnou součástí dnešního moderního světa např. výkonové elektronické obvody (měniče) atd. a nebo vytváření simulačních modelů obvodů a jejich následné přidávání do knihovny OrCad – Pspice, pro zjednodušení, při vytváření složitějších zapojení.

Přínosem této bakalářské práce bylo vyzkoušení teoretických poznatků, které jsem získal během svého studia. Nejzajímavější částí byla možnost nastavovat různé podmínky a sledovat jak se obvod chová. Důležitým faktem bylo také to, že jsem vše mohl vytvářet pomocí softwaru na počítači, což zjednodušuje práci při získávání cenných dat.

Použitá literatura

- [1] BRANDŠTETTER, Pavel. *Elektronika*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2005.
- [2] FROHN, Manfred, et al. *Elektronika : Polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha : BEN, 2006. 480 s.
- [3] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika : Obvody, součástky, děje*. Praha : BEN, 1998. 480 s.
- [4] HAMMER, Miloš; KUDLÁČ, Bohumil; BALABÁN, Bedřich. *Elektrotechnika*. Brno : VUTUM, 1999. 103 s.
- [5] *Abcdimenze.wz.cz* [online]. 2007 [cit. 2009-12-02]. Usměrnovače. Dostupné z WWW: <<http://abcdimenze.wz.cz/elektronika/usmernovace.html>>.
- [6] BRANDŠTETTER, Pavel. *Technické prostředky pro řízení elektrických pohonů*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2005.
- [7] VYSOKÝ, Ondřej. *Dce.felk.cvut.cz* [online]. 2002 [cit. 2010-12-02]. Elektronické systémy. Dostupné z WWW: <<http://dce.felk.cvut.cz/es1/skripta/e4.pdf>>.
- [8] Filtr (zpracování signálu) In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 4. 12. 2006, 22. 2. 2010 [cit. 2010-12-02]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Filtr_\(zpracování_signálu\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Filtr_(zpracování_signálu))>.
- [9] Stabilizátor napětí In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 7. 11. 2007, 19. 12. 2009 [cit. 2010-01-27]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Stabilizátor_napětí>.
- [10] KRŮŽELA, Miroslav. *Stabilizátory napětí a jejich řešení* [online]. Zlín, 2008. 65 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati. Dostupné z WWW: <https://www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download_this_unauthorized=9299>.
- [11] HANUS, Stanislav. *Elektronika*. Brno : Vysoké učení technické, 1991. 217 s.
- [12] Elektronika In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 19. 2. 2006, 20. 4. 2010 [cit. 2010-02-23]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronika>>.
- [13] *Referaty-seminarky.sk* [online]. 2007 [cit. 2010-02-23]. Historický vývoj elektroniky. Dostupné z WWW: <<http://referaty-seminarky.sk/historicky-vyvoj-elektroniky/>>.
- [14] *Jergym.hiedu.cz* [online]. 2005 [cit. 2010-02-23]. Sir John Ambrose Fleming. Dostupné z WWW: <<http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/objevite/objev4/fle.htm>>.